

**LEMBAR PENGESAHAN**  
**SISTEM PENGENDALIAN SUHU PADA *BOILER* MENGGUNAKAN**  
**KONTROLER PID BERBASIS ARDUINO UNO**

**SKRIPSI**

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK KONTROL

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**DIDIT AFRIAN NUGRAHA**  
**NIM. 135060301111095**

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing  
pada tanggal 27 Juli 2018

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Rahmadwati, S.T., M.T., Ph.D.  
NIP. 19771102 200604 2 003

Dr. Ir. Erni Yudaningtyas, M.T.  
NIP. 19650913 199002 2 001

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Elektro



Hadri Suyono, S.T., M.T., Ph.D., IPM.  
NIP. 19730520 200801 1 013

JUDUL SKRIPSI :

SISTEM PENGENDALIAN SUHU PADA *BOILER* MENGGUNAKAN KONTROLER  
PID BERBASIS ARDUINO UNO

Nama Mahasiswa : Didit Afrian Nugraha  
NIM : 135060301111095  
Program Studi : Teknik Elektro  
Konsentrasi : Teknik Kontrol

KOMISI PEMBIMBING

Ketua : Rahmadwati, ST., MT., Ph.D.

Anggota : Dr. Ir. Erni Yudaningtyas, M.T.

TIM DOSEN PENGUJI :

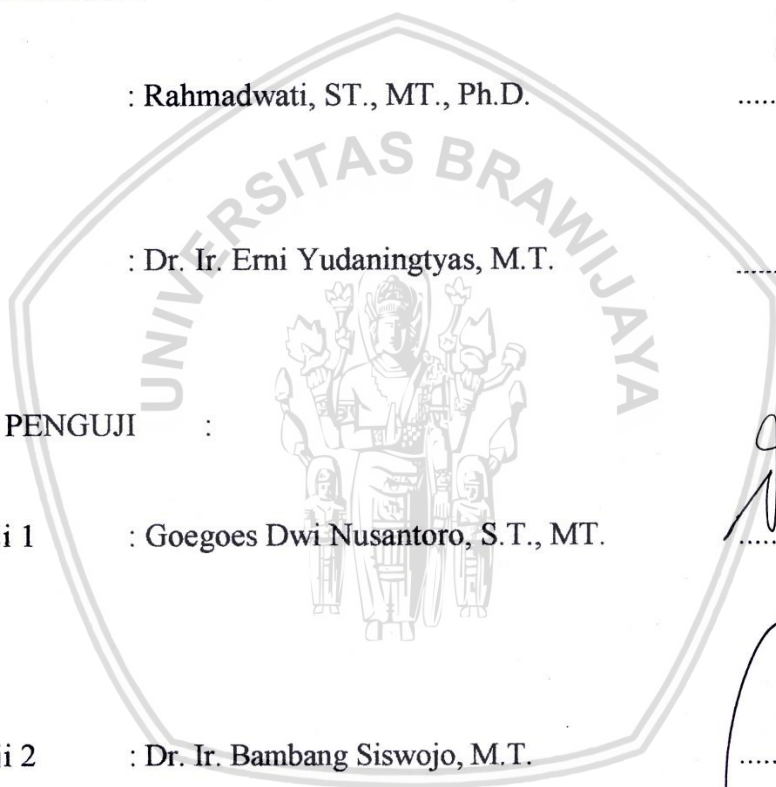
Dosen Penguji 1 : Goegoes Dwi Nusantara, S.T., MT.

Dosen Penguji 2 : Dr. Ir. Bambang Siswojo, M.T.

Dosen Penguji 3 : Dipl. Ing. Ir. Moch. Rusli

Tanggal Ujian : 23 Juli 2018

SK Penguji : No. 1504 Tahun 2018



**SISTEM PENGENDALIAN SUHU PADA *BOILER*  
MENGUNAKAN KONTROLER PID BERBASIS ARDUINO UNO**

**SKRIPSI**

**TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK KONTROL**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**DIDIT AFRIAN NUGRAHA**  
**NIM. 135060301111095**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**  
**FAKULTAS TEKNIK**  
**MALANG**  
**2018**



*Teriring Ucapan Terima Kasih kepada:  
Ayahanda dan Ibunda Tercinta*





## PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

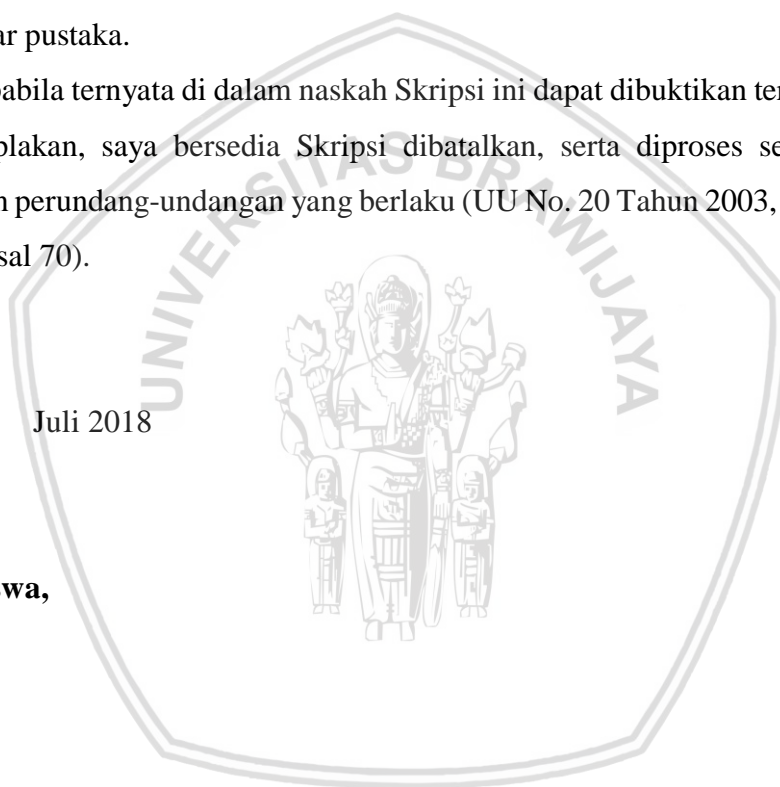
Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, Juli 2018

**Mahasiswa,**

**Didit Afrian Nugraha**

**NIM. 135060301111095**









## RINGKASAN

**Didit Afrian Nugraha**, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2018, Sistem Pengendalian Suhu pada *Boiler* Menggunakan Kontroler PID Berbasis Arduino UNO, Dosen pembimbing: Rahmadwati dan Erni Yudaningtyas.

Konsumsi energi listrik di Indonesia setiap tahunnya terus meningkat. Salah satu cara untuk memenuhi konsumsi listrik yang semakin banyak di Indonesia salah satunya memanfaatkan produksi listrik dengan menggunakan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Pada PLTU, *boiler* adalah salah satu peralatan penting yang digunakan sebagai pemanas air untuk memproduksi *steam* (uap). *Steam* tersebut digunakan untuk proses selanjutnya, seperti penggerak turbin generator yang akan menghasilkan energi listrik, pemanas ruangan, mesin uap dan lain sebagainya. Sempurna atau tidaknya proses pemanasan awal pada *boiler* ditentukan oleh besarnya tekanan dan temperaturnya, oleh karena itu kedua faktor tersebut dijaga agar selalu berada pada nilai standar yang ditetapkan. Jika tekanan dan temperatur pada *boiler* tidak dijaga, akan menyebabkan kerusakan pada perangkat lainnya. Sistem pengendalian suhu pada *boiler* menggunakan kontroler PID kemudian suhu dikendalikan sebesar 100°C. Arduino Uno digunakan sebagai alat pengendali, serta motor DC Servo sebagai penggerak tuas kompor *portable* untuk sumber panas. Perancangan kontroler PID pada suhu menggunakan metode *Ziegler-Nichols*, didapatkan nilai parameter yang sesuai untuk sistem dengan nilai  $K_p=13.54$ ,  $K_i=0,059$ ,  $K_d=771,78$

**Kata Kunci:** Suhu, *boiler*, PID, *Ziegler-Nichols*.



## SUMMARY

**Didit Afrian Nugraha**, *Departement of Electrical Engineering, Faculty of Engineering University of Brawijaya, July 2018, System Controlling Temperatures in Boiler uses a PID Controller based Arduino Uno, Academi Supervisor: Rahmadwati dan Erni Yudaningtyas.*

*In Indonesia Electricity consumption every year continues to increase. One way to meet the growing electricity consumption is to utilize electricity production using a Steam Power Plant (PLTU). In PLTU a boiler is one of important componence in system that is for heating water and produce steam. This steam is use for the next proses such us turbin generator that is produce electricity, room heater, steam engine, etc. the pre-heating proses in boiler is decide by the amount of preasure and temperature, that is why bot of those vectors are keep to the standart set. If the pressure and temperature of the boiler are not maintained, will be damage to other part. Controlling temperature in boiler uses a PID controller then temperature set of 100°C. Arduino Uno is used as a tool of controlling, than motor DC servo as stove lever movers for heat sources. The design of PID controller in the temperature using the Ziegler-Nichols method, the corresponding parameter values are obtained for the system with a value of  $K_p = 13,54$ ,  $K_i = 0,059$   $K_d = 771,78$ .*

**Keywords:** *Temperature, boiler, PID, Ziegler-Nichols.*

## PENGANTAR

Bismillahirrohmanirrohim. Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Sistem Pengendalian Suhu pada *Boiler* Menggunakan Kontroler PID Berbasis Arduino UNO” dengan baik. Tak lepas shalawat serta salam tercurahkan kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW yang telah menjadi suri tauladan bagi yang mengharapkan rahmat dan hidayah-Nya.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan, bimbingan serta dorongan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar – besarnya kepada:

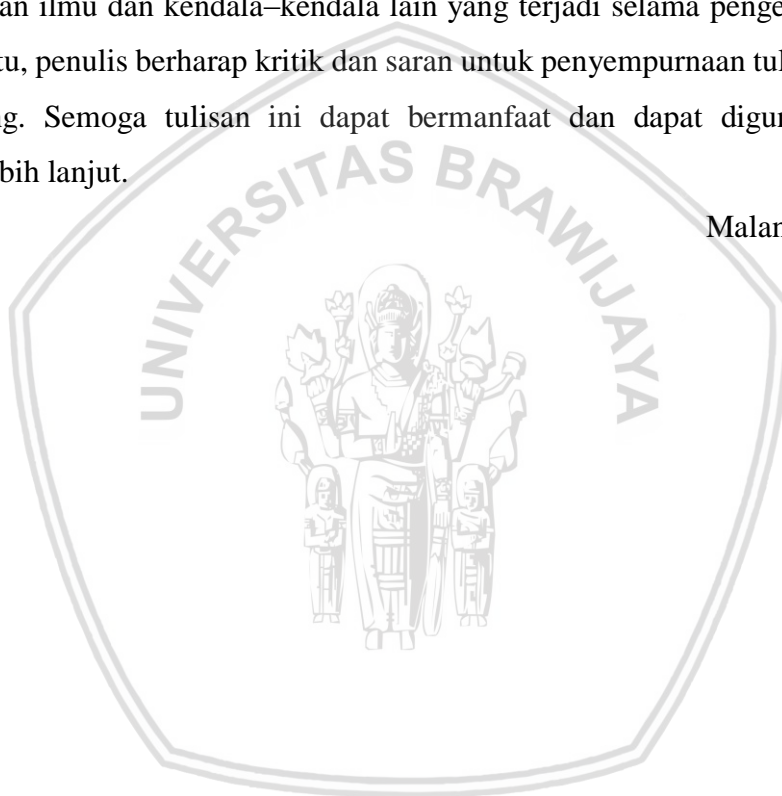
- Allah SWT yang telah memberikan kelancaran, kemudahan dan hidayah-Nya.
- Bapak dan Ibu tercinta, Bapak Margono, S.Pd. dan Ibu Sutatik yang selalu memberikan kasih sayang, motivasi dan do’a yang tak pernah putus, semoga panjang umur dan sehat selalu Bapak, Ibu.
- Ir. Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D., IPM., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
- Ir. Nurussa’adah, M.T., selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
- Ali Mustofa, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
- Ir. Purwanto, M.T. selaku Ketua Kelompok Dosen Keahlian Teknik Kontrol Program Studi S1 Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
- Rahmadwati, S.T., M.T., Ph.D., selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan kesempatan, nasihat, pengarahan, saran dan motivasi.
- Dr. Ir. Erni Yudaningtyas, M.T., selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan kesempatan, nasihat, pengarahan, saran dan motivasi.
- Teman-teman Kepengurusan Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro, khususnya pengurus inti Eksekutif Mahasiswa Teknik Elektro, Mukti, Citra, Taufik, Alief, Anggoro, Abyan, Reza Sufi, M. Iqbal terimakasih telah memberikan banyak bantuan dan canda tawa.
- Teman-teman divisi himpunan, Ketua Angkatan 2013 Yovie Sigit Arif Ferdiansyah yang telah memberikan bantuan dan motivasi, Yovie, Yudha, Kresna, Mukti, Ekky, Odes Sam Abdul, Sam Rosyid banyak memberikan canda tawa.
- Teman-teman grup *Kapan Main Bareng?* yang berganti nama menjadi *cefangnistry malang* yang selalu memberikan keceriaan dan canda tawa.

- M. Alwin A, Haris Altamira, Melody, Vicky teman sependaftaran sidang dll, tangames.
- Keluarga besar Teknik Kontrol 2013 dan Spectrum 2013 untuk dukungan, semangat serta momen yang tak terlupakan.
- Terimakasih kepada Dwi Novita Anugrahini yang telah sabar dan setia menunggu selama 6th, mulai dari tahun 2012 sampai 2018, terimakasih atas doanya, semangat dan motivasinya.
- Semua pihak, yang telah memberikan bantuan serta dukungan baik secara langsung maupun tidak langsung atas penyusunan skripsi ini,terimakasih banyak.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa skripsi ini belumlah sempurna, karena keterbatasan ilmu dan kendala–kendala lain yang terjadi selama pengerjaan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis berharap kritik dan saran untuk penyempurnaan tulisan di masa yang akan datang. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat dan dapat digunakan untuk pengembangan lebih lanjut.

Malang, Juli 2018

Penulis



## DAFTAR ISI

<b>PENGANTAR.....</b>	<b>i</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>iii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>v</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>vii</b>
 <b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	 <b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Manfaat.....	3
 <b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	 <b>5</b>
2.1 Ketel Uap ( <i>Boiler</i> ) .....	5
2.1.1 Ketel Uap dengan Pembakaran di Dalam.....	6
2.1.2 Ketel Uap dengan Pembakaran di Luar.....	7
2.2 Mikrokontroler Arduino UNO R3.....	7
2.3 Motor DC Servo MG996R .....	9
2.4 PWM ( <i>Pulse Width Modulation</i> ).....	10
2.5 Sensor Suhu termokopel type-k.....	11
2.6 Kotroler.....	12
2.6.1 Kontroler Proporsional (P) .....	13
2.6.2 Kontroler Integral (I) .....	14
2.6.3 Kontroler Derivatif (D).....	14
2.6.4 Kontroler PID .....	15
2.7 Respon sistem .....	16
2.7.1 Sistem Orde Satu .....	17
2.8 Metode <i>Ziegler Nichols</i> .....	19
2.9 Kestabilan sistem.....	22
2.9.1 Analisis kestabilan sistem.....	22
 <b>BAB III METODE PENELITIAN.....</b>	 <b>25</b>
3.1 Perancangan Diagram Blok Sistem .....	25

3.2 Spesifikasi Alat .....	26
3.3 Karakterisasi Setiap Blok .....	28
3.3.1 Pengujian Sensor Termokopel Type-K .....	29
3.3.2 Pengujian Motor DC Servo MG996R .....	31
3.3.3 Karakteristik <i>Plant</i> .....	33
3.5 Pembuatan Perangkat Keras .....	34
3.6 Perancangan Algoritma .....	34
3.6.1 Perancangan Kontrol PID .....	35
3.7 Perancangan <i>Flowchart</i> Program Utama .....	36

#### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

4.1 Pengujian Keseluruhan Sistem .....	39
4.2 Penguian Keseluruhan Sistem dengan diberikan Gangguan .....	40
4.2.1 Pengujian dengan Gangguan Penambahan Satu Liter Air .....	40
4.2.2 Pengujian dengan Gangguan Penambahan Dua Liter Air .....	41

#### **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

5.1 Kesimpulan .....	43
5.2 Saran .....	43

<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>45</b>
-----------------------------	-----------

<b>Lampiran .....</b>	<b>47</b>
-----------------------	-----------



**DAFTAR TABEL**

Tabel 2.1 Spesifikasi Arduino UNO.....	8
Tabel 2.2 Spesifikasi Motor DC Servo MG996R.....	10
Tabel 2.3 Aturan Penalaan <i>Ziegler-Nichols</i> .....	21
Tabel 3.1 Perbandingan Suhu.....	30
Tabel 3.2 Hasil Pengujian Motor DC Servo MG996R.....	32
Tabel 3.3 Aturan Tuning Metode 1 <i>Ziegler-Nichols</i> .....	36



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Ketel Uap dengan Pembakaran di Dalam.....	6
Gambar 2.2 Ketel Uap dengan Pembakaran di Luar.....	7
Gambar 2.3 Arduino UNO .....	8
Gambar 2.4 Motor DC MG996R .....	10
Gambar 2.5 Sinyal PWM Secara Umum.....	11
Gambar 2.6 Sensor Suhu termokopel type-k.....	12
Gambar 2.7 Kontroler Proporsional .....	14
Gambar 2.8 Kontroler Integral .....	14
Gambar 2.9 Kontroler Diferensial.....	15
Gambar 2.10 Diagram Blok Kontrol PID .....	15
Gambar 2.11 Grafik fungsi input step dan ramp .....	16
Gambar 2.12 Tanggapan transien dan tanggapan keadaan tunak .....	17
Gambar 2.13 Tanggapan sistem orde satu terhadap fungsi step .....	18
Gambar 2.14 Respon orde dua terhadap fungsi step .....	18
Gambar 2.15 Karakteristik under damped .....	18
Gambar 2.16 Kurva Respon Unit Step yang Menunjukkan 25% <i>Maximum Overshoot</i> .....	19
Gambar 2.17 Respon Plant Terhadap Masukan Berupa Unit Step .....	19
Gambar 2.18 Kurva Respon yang Berbentuk S .....	20
Gambar 2.19 Sistem Loop Tertutup dengan Kontrol Proporsional.....	21
Gambar 2.20 Osilasi Berkesinambungan dengan Periode $P_{cr}$ .....	21
Gambar 2.21 Pergeseran/Penggantian Bidang S menjadi Sumbu Z .....	22
Gambar 3.1 Blok Diagram Sistem .....	25
Gambar 3.2 Skema Perancangan Perangkat Keras .....	27
Gambar 3.3 Skema Perancangan <i>Boiler</i> .....	27
Gambar 3.4 Rancangan Sistem .....	28
Gambar 3.5 Grafik hasil perbandingan pembacaan data sensor termokopel type-k.....	31
Gambar 3.6 Rangkaian Pengujian Motor DC Servo MG996R .....	32
Gambar 3.7 Perbandingan Nilai Keluaran Sudut .....	33
Gambar 3.8 Rangkaian Pengujian Karakteristik <i>Plant</i> .....	33

Gambar 3.9 Respon <i>Ziegler-Nichols</i> .....	34
Gambar 3.10 Kurva Respon yang Berbentuk S.....	35
Gambar 3.11 Grafik Penentuan $K_p$ , $K_i$ , $K_d$ .....	36
Gambar 3.12 <i>Flowchart</i> Program Utama .....	37
Gamabar 4.1 Grafik Respon Sistem .....	41
Gamabar 4.2 Grafik Respon Sistem dengan Gangguan Satu Liter Air .....	42
Gambar 4.3 Grafik Respon Sistem dengan Gangguan Dua Liter Air .....	43





## BAB I

### PENDAHULUAN

#### 1.1 Latar Belakang

Tenaga listrik merupakan salah satu kebutuhan yang paling pokok untuk menunjang kehidupan manusia. Konsumsi energi listrik dalam kurun waktu tiga tahun terakhir dari tahun 2011 sampai 2013 selalu mengalami peningkatan. Menurut data dari PT. PLN Pada tahun 2011 penggunaan energi listrik 157.992,66 GWh, tahun 2012 173.990,74 GWh dan terus meningkat hingga tahun 2013 sebesar 187.541,02 GWh (Statistik PLN 2013). Untuk memenuhi konsumsi listrik yang semakin banyak yaitu dengan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu penghasil listrik yang sumber panasnya bisa berasal dari batu bara, nuklir, gas, minyak, maupun panas bumi. Salah satu komponen utama dalam PLTU adalah *boiler* atau ketel uap. *Boiler* merupakan salah satu peralatan penting yang digunakan sebagai pemanas air untuk memproduksi *steam* (uap) dalam industri yang dapat digunakan untuk proses selanjutnya, seperti penggerak turbin generator yang akan menghasilkan energi listrik, pemanas ruangan, mesin uap dan lain sebagainya (Falah, R.M.N 2010).

*Boiler* mencakup beberapa sistem, salah satu diantaranya adalah sistem air umpan. Sistem air umpan berfungsi sebagai penyedia air untuk *boiler* yang bekerja secara otomatis sesuai dengan kebutuhan *steam* dan *boiler* sendiri. Sistem *steam* berfungsi sebagai penyedia uap air untuk proses pada plant yang lain. *Boiler* bekerja dengan menggunakan air yang berada didalamnya. Air di dalam terus berkurang sehingga diperlukan pengisian air di dalam *boiler*, karena air yang dimasukan memiliki temperatur yang berbeda dengan air yang berada didalam *boiler* maka terjadi penurunan temperatur suhu dan berpengaruh pada penghasilan uap bertekanan yang diperlukan untuk proses selanjutnya. Pengontrolan suhu dalam sistem pembakaran *boiler* sangat penting dalam proses aliran ke *Steam Turbine* (Hanafi, A.R 2016).

Sempurna atau tidaknya proses pemanasan awal pada *boiler* ditentukan oleh besarnya tekanan dan temperturnya, oleh karena itu kedua faktor tersebut dijaga agar selalu berada pada nilai standar yang ditetapkan. Jika tekanan dan temperatur pada *boiler* tidak dijaga, sangat besar kemungkinannya terjadi kerusakan pada beberapa bagian. Suhu yang harus dijaga paa saat proses di dalam *boiler* adalah 308°C. Oleh sebab itu, dalam penelitian kali

ini membahas tentang pengendalian suhu pada *boiler* dengan menggunakan kontroler PID (Proporsional, Integral, Diferensial). Metode penalaran untuk parameter kontroler PID juga bermacam-macam, antara lain: *Root locus*, *Ziegler Nichols*, *Cohen-coon*, dan lain-lain. (Kurniawan W, 2009) Penggunaan kontroler ini karena dapat digunakan untuk mengontrol suhu, serta bertujuan untuk mempercepat respon sebuah sistem, mengurangi *error steady state* dan menghasilkan perubahan awal yang besar (Ogata, 2011)

Berdasarkan permasalahan tersebut, dapat dibuat suatu pengontrolan *boiler* secara otomatis dengan mengatur suhu air untuk meminimalisir penurunan temperatur pada *boiler* dengan sistem pembakaran menggunakan kompor gas lebih optimal dan menghasilkan perubahan awal yang besar. Belum ada penelitian tentang pengendalian suhu pada *boiler* menggunakan kontroler PID dengan menggunakan perangkat elektronik yang mempunyai kemampuan sebagai penghubung dengan alat-alat yang akan digunakan, yaitu Arduino Uno R3, serta pengolahan data menggunakan metode *Ziegler Nichols*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Mengacu pada permasalahan yang telah diuraikan pada latar belakang, maka rumusan masalah dapat ditekan pada poin berikut :

1. Bagaimana merancang dan membuat sistem pengendalian suhu pada *boiler* menggunakan kontroler PID.
2. Bagaimana respon sistem setelah diberi kontroler jika diberi gangguan.

## 1.3 Batasan Masalah

Mengacu pada permasalahan yang telah dirumuskan, maka hal-hal yang berkaitan dengan perancangan akan diberi batasan sebagai berikut :

1. *Boiler* yang digunakan adalah wadah tabung dengan ukuran tinggi dan diameter yaitu 25 cm x 25 cm.
2. Motor yang digunakan adalah Motor DC Servo MG996R.
3. Mikrokontroler yang digunakan adalah Arduino UNO R3.
4. Sensor yang digunakan adalah sensor suhu termokopel *type-K*.
5. Pembangkit atau pemanas menggunakan kompor *portable*.
6. Gangguan berupa penambahan air pada *plant*.
7. Pembahasan tentang tekanan, level air dan besar uap yang keluar dari boiler tidak dibahas secara mendalam.
8. Metode yang digunakan untuk mencari  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  adalah *Ziegler-Nichols*.
9. Air yang digunakan adalah air yang digunakan sehari-hari.
10. Alat merupakan *miniatur* dari penjelasan yang sudah dijabarkan sebelumnya.

11. Pembahasan mengenai mekanik, model matematis, serta rangkaian elektronika tidak dibahas secara mendalam.
12. Suhu yang diinginkan yaitu  $100^{\circ}\text{C}$ .

#### 1.4 Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah untuk merancang sistem yang dapat mempertahankan suhu pada *boiler*, meskipun terdapat gangguan berupa penambahan air dengan temperatur normal dengan mempertahankan suhu dengan menggunakan kontroler PID.

#### 1.5 Manfaat

Manfaat adalah dapat dipahaminya penerapan sistem pengendalian suhu pada *boiler* dengan kontroler PID dengan metode *ziegler-nichols*, dengan kondisi *plant* yang selalu berubah-ubah.







## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

Dalam rencana penelitian perancangan dan karakteristik pengendali suhu pada *boiler* dibutuhkan penunjang mengenai berbagai hal yang mendukung penelitian ini. Teori penunjang dalam penelitian diperlukan untuk mempermudah pemahaman tentang prinsip kerja dari komponen yang digunakan serta memberikan pemahaman mengenai teori pendukung lainnya. Pemahaman ini bermanfaat dalam penelitian dan pengambilan data penelitian. Teori penunjang yang mendukung meliputi plant *boiler*, Arduino UNO R3, motor DC Servo MG996R, *Pulse Width Modulation* (PWM), sensor suhu termokopel *type-k*, kontroler PID, metode kontroler.

#### 2.1 Ketel Uap (*Boiler*)

Ketel uap atau *boiler* adalah suatu alat berbentuk bejana tertutup yang digunakan untuk menghasilkan steam. Steam diperoleh dengan memanaskan bejana yang berisi air dengan bahan bakar (Yohana dan Askhabulyamin 2009: 13). Boiler mengubah energi-energi kimia menjadi bentuk energi yang lain untuk menghasilkan kerja. Boiler dirancang untuk melakukan atau memindahkan kalor dari suatu sumber pembakaran, yang biasanya berupa pembakaran bahan bakar.

Sistem boiler terdiri dari: sistem air umpan (*feed water system*), sistem uap air (*steam system*) dan sistem bahan bakar (*fuel system*). Sistem air umpan (*feed water system*) menyediakan air untuk boiler secara otomatis sesuai dengan kebutuhan steam. Berbagai kran disediakan untuk keperluan perawatan dan perbaikan. Sistem steam (*steam sistem*) mengumpulkan dan mengontrol produksi steam dalam boiler. Steam dialirkan melalui sistem pemipaan ke titik pengguna. Pada keseluruhan sistem, tekanan steam diatur menggunakan kran dan dipantau dengan alat pemantau tekanan. Sistem bahan bakar (*fuel sistem*) adalah semua peralatan yang digunakan untuk menyediakan bahan bakar untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan. Peralatan yang diperlukan pada sistem bahan bakar tergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan pada sistem.

Boiler berfungsi sebagai alat konversi energi yang mengkonversikan energi kimia (potensial) dari bahan bakar menjadi energi panas. Boiler terdiri dari 2 komponen utama, yaitu:

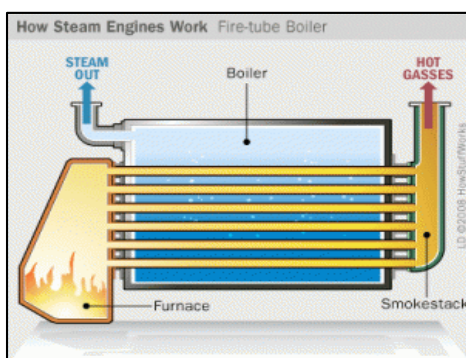
1. Dapur sebagai alat untuk mengubah energi kimia menjadi energi panas.
2. Alat penguap (*evaporator*) yang mengubah energi pembakaran (energi panas) menjadi energi potensial uap (energi panas).

Kedua komponen tersebut dia atas telah dapat untuk memungkinkan sebuah boiler untuk berfungsi. Boiler pada dasarnya terdiri dari bumbungan (drum) yang tertutup pada ujung pangkalnya dan dalam perkembangannya dilengkapi dengan pipa api maupun pipa air. Banyak orang mengklasifikasikan ketel uap tergantung kepada sudut pandang masing-masing (Syamsir, A. M., 1988 : 8)

### 2.1.1 Ketel Uap dengan Pembakaran di Dalam (*Internally Fired Steam Boiler*)

Ketel dengan pembakaran di dalam merupakan jenis *boiler* yang pembakarannya berada didalam pipa *boiler*. *Boiler* jenis ini memiliki ruang pembakaran (*furnace*) dibagian dalam *boiler*. Sistem dengan pembakaran yang berada di dalam digunakan pada *boiler* jenis pipa api (*fire tube boiler*). Pembakaran pada *boiler* ini, fluida yang mengalir adalah gas hasil pembakaran. Panas ini mentransfer ke air yang berada di *boiler* melalui bidang pemanas, dalam sistem ini pembakaran berada didalam *boiler*.

Boiler jenis ini pada bagian pipanya dialiri dengan gas pembakaran dan bagian lainnya yaitu sell dialiri air yang akan diuapkan. Tube-tubanya langsung didinginkan oleh air yang melindunginya. Jumlah pass dari boiler tergantung dari jumlah laluan horizontal dari gas pembakaran diantara furnace dan pipa-pipa api. Laluan gas pembakaran pada furnace dihitung sebagai pass pertama. Boiler jenis ini banyak dipakai untuk industri pengolahan mulai skala kecil sampai skala menengah (Raharjo dkk, 2008). Gambar ketel uap pembakaran di dalam dapat dilihat dalam Gambar 2.1:



Gambar 2.1 Ketel Uap dengan Pembakaran di Dalam  
Sumber : <http://hima-tl.ppns.ac.id/ketel-uap-boiler/>

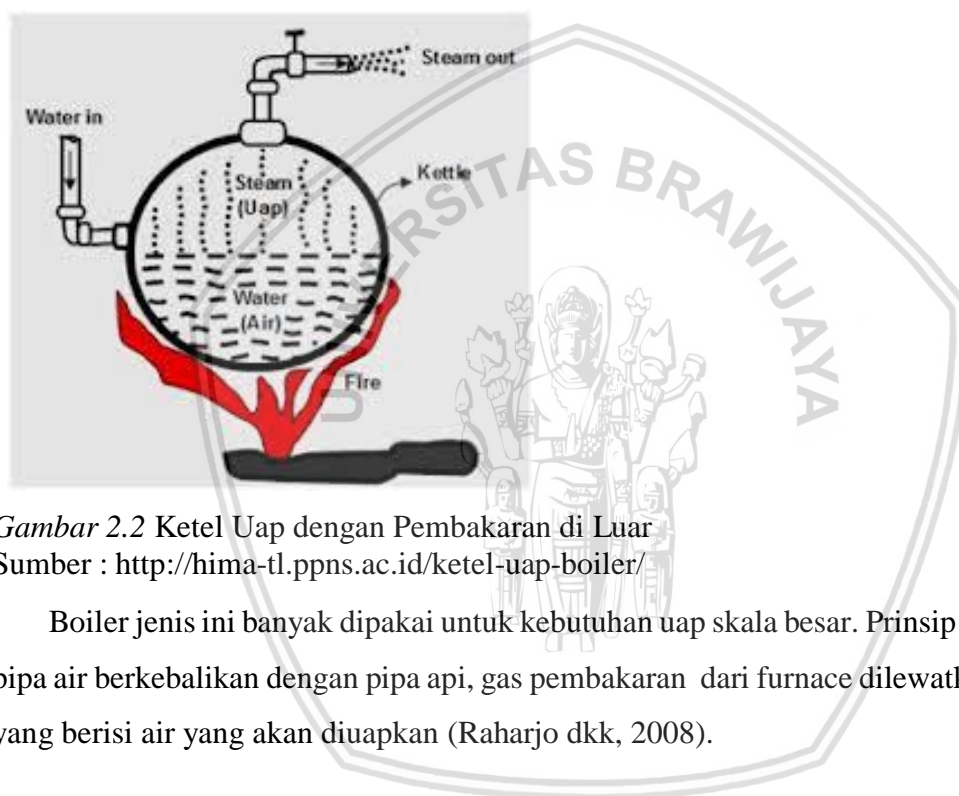
### 2.1.2 Ketel Uap dengan Pembakaran di Luar (*Outernally Fired Steam Boiler*)

Ketel pembakaran di luar merupakan jenis *boiler* yang pembakarannya berada di bagian luar pipa pada *boiler*. *Boiler* ini dapur bakar ditempatkan di bawah ketel, kebanyakan kerel pipa air memakai sistem ini. (Syamsir A. M., 1988)

Ketel pipa air yang menggunakan bahan bakar padat. Karakteristik ketel pipa air:

1. Tingkat efisiensi panas yang tinggi.
2. Memiliki ruang penampung uap yang besar.
3. Konstruksi sederhana.

Gambar ketel uap pembakaran di dalam dapat dilihat dalam Gambar 2.2:



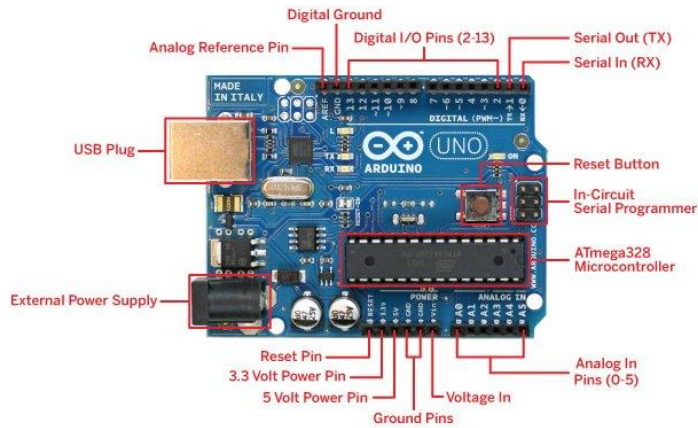
Gambar 2.2 Ketel Uap dengan Pembakaran di Luar  
Sumber : <http://hima-tl.ppns.ac.id/ketel-uap-boiler/>

Boiler jenis ini banyak dipakai untuk kebutuhan uap skala besar. Prinsip kerja dari boiler pipa air berkebalikan dengan pipa api, gas pembakaran dari furnace dilewatkan ke pipa-pipa yang berisi air yang akan diuapkan (Raharjo dkk, 2008).

## 2.2 Arduino UNO R3

Arduino UNO adalah *board* mikrokontroler berbasis Atmega328. Arduino UNO mempunyai 14 pin digital *input/output* (6 diantaranya dapat digunakan sebagai *output* PWM), 6 *input* analog, sebuah osilator kristal 16 MHz, sebuah koneksi USB, sebuah *power jack*, sebuah ICSP *header*, dan sebuah tombol *reset*. Arduino UNO memuat semua yang dibutuhkan untuk menunjang mikrokontroler, mudah menghubungkan ke sebuah komputer dengan sebuah kabel USB atau mensuplai dengan sebuah adaptor AC ke DC atau menggunakan baterai untuk memulainya. (Andriansyah A. 2013)

Arduino Uno R3 dapat dilihat dalam Gambar 2.3 serta spesifikasi Arduino Uno R3 ditunjukkan dalam Tabel 2.1.



Gambar 2.3 Arduino UNO R3  
Sumber : Arduino, Inc (2009).

Tabel 2.1 Spesifikasi Arduino UNO R3

Mikrokontroler	Atmega328
Tegangan Operasi	5 Volt
Input Voltage (disarankan)	7 – 12 Volt
Input Voltage (batas akhir)	6 – 20 Volt
Digital I/O Pin	14 (6 pin sebagai output PWM)
Analog Input Pin	6
Arus DC per pin I/O	40 mA
Arus DC untuk pin 3.3V	50 mA
Flash Memory	32 KB (0,5 KB untuk bootloader)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Clock Speed	16 MHz

Masing-masing dari 14 pin UNO dapat digunakan sebagai input atau output, menggunakan perintah fungsi `pinMode()`, `digitalWrite()`, dan `digitalRead()` yang menggunakan tegangan operasi 5 volt. Tiap pin dapat menerima arus maksimal hingga 40mA dan resistor internal pull-up antara 20-50kohm.

1. Serial: 0 (RX) dan 1 (TX). Sebagai penerima (RX) dan pemancar (TX) TTL serial data. Pin ini terkoneksi untuk pin korespondensi chip ATmega8U2 USB-to-TTL Serial.
2. External Interrupts: 2 dan 3. Pin ini berfungsi sebagai konfigurasi trigger saat interupsi value low, naik, dan tepi, atau nilai value yang berubah-ubah.



3. PWM: 3, 5, 6, 9, 10, dan 11. Melayani output 8-bit PWM dengan fungsi `analogWrite()`.
4. SPI: 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK). Pin yang support komunikasi SPI menggunakan SPI library.
5. LED: 13. Terdapat LED indikator bawaan (built-in) dihubungkan ke digital pin 13, ketika nilai value HIGH led akan ON, saat value LOW led akan OFF.
6. Uno memiliki 6 analog input tertulis di label A0 hingga A5, masing-masingnya memberikan 10 bit resolusi (1024). Secara asal input analog tersebut terukur dari 0 (ground) sampai 5 volt, itupun memungkinkan perubahan teratas dari jarak yang digunakan oleh pin AREF dengan fungsi `analogReference()`.

### 2.3 Motor DC Servo MG996R

Motor listrik sangat sering digunakan sebagai elemen kontrol akhir dalam sistem kontrol. Prinsip kerja dasar dari sebuah motor listrik adalah gaya yang bekerja pada konduktor yang berada di dalam suatu medan magnet ketika ada arus yang melewati konduktor tersebut. (Bolton W. 2006)

Motor DC Servo MG996R memerlukan suplai tegangan yang searah pada kumparan medan untuk diubah menjadi energi mekanik. Bagian utama motor DC adalah stator (bagian yang tidak berputar) dan kumparan jangkar disebut rotor (bagian yang berputar). Catu tegangan DC dari baterai menuju ke lilitan melalui sikat yang menyentuh komutator, dua segmen yang terhubung dengan dua ujung lilitan. Kumparan dalam satu lilitan disebut angker dinamo. Angker dinamo adalah sebutan untuk komponen yang berputar di antara medan magnet.

Motor servo MG996 ini adalah versi lebih baru dari servo motor seri MG946 dan MG995, servo motor berkinerja tinggi dengan gear logam (metal gear), ball bearing ganda, 180° rotasi, kabel koneksi sepanjang 30 cm, dan dilengkapi dengan aksesoris untuk digunakan sesuai kebutuhan. Servo motor ini cocok untuk aplikasi yang membutuhkan motor dengan torsi yang memadai hingga 13 kg.cm (batas stall torque pada 7,2 Volt). Dibanding pendahulunya (MG995), servo ini bekerja dengan lebih akurat, lebih cepat dan responsif, dan berdaya lebih kuat. Pada catu daya 4,8 Volt yang merupakan tegangan minimum untuk mengoperasikan motor ini, kecepatan operasi motor ini mencapai 0,17 detik untuk rotasi 60° (pada catu daya 4,8 Volt tanpa beban), dengan batas stall torque sebesar 9,4 kg.cm.

Keunggulan dari penggunaan motor servo adalah :

1. Tidak bergetar dan tidak ber-resonansi saat beroperasi.

2. Daya yang dihasilkan sebanding dengan ukuran dan berat motor.
3. Penggunaan arus listrik sebanding dengan beban yang diberikan.
4. Resolusi dan akurasi dapat diubah dengan hanya mengganti encoder yang dipakai.

Motor DC MG996R dapat dilihat dalam Gambar 2.4 serta spesifikasi Motor DC Servo MG996R dalam Tabel 2.2, sebagai berikut:



Gambar 2.4 Motor DC MG996R

Spesifikasi Motor DC Servo MG996R dalam Tabel 2.2 :

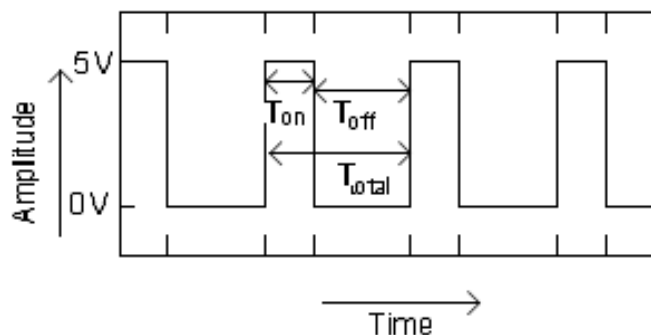
Berat	55 gram
Dimensi	40.7 x 19.7 x 42.9 mm
Rentang Rotasi	9.4 kgf·cm (4.8 V ), 11 kgf·cm (6 V)
Operasi Kecepatan	0.17 s/60° (4.8 V), 0.14 s/60° (6 V)
Operasi Tegangan	4.8 V a 7.2 V
Arus	500 mA – 900 mA (6V)
Akurasi	5 μs
Temperatur	0°C-55°C

#### 2.4 Pulse Width Modulation (PWM)

*Pulse Width Modulation (PWM)* adalah metode yang dapat digunakan untuk mengatur kecepatan dari motor DC. Dimana kecepatan motor DC tergantung pada besarnya *duty cycle* yang diberikan pada motor dc tersebut.

Pada sinyal *Pulse Width Modulation (PWM)*, frekuensi sinyal konstan sedangkan *duty cycle* bervariasi dari 0%-10%. *Duty cycle* adalah besarnya sinyal kontrol yang diberikan pada motor. Persamaan untuk perhitungan *duty cycle* ditunjukkan pada persamaan 2.2 dengan Ton adalah periode logika tinggi, dan T adalah periode keseluruhan. Sinyal *Pulse Width Modulation (PWM)* secara umum dapat dilihat dalam Gambar 2.5.





Gambar 2.5 Sinyal PWM Secara Umum

Sumber : [www.electrooons.com](http://www.electrooons.com).

$$T_{total} = T_{on} + T_{off} \quad (2-1)$$

dimana keterangan sebagai berikut :

$T_{on}$  = Waktu Pulsa *High*

$T_{off}$  = Waktu Pulsa *Low*

$$D = \frac{T_{on}}{T} \times 100\% \quad (2-2)$$

dimana keterangan sebagai berikut :

$D$  = *Duty Cycle* adalah lamanya pulsa *high* dalam satu periode

$T_{on}$  = Waktu Pulsa *High*

$T$  = Periode Pulsa

$$V_{out} = D \times V_{in}$$

## 2.5 Sensor Termokopel *Type-K*

Termokopel ini merupakan termokopel yang biasa digunakan dalam berbagai kegiatan industri. Selain harganya yang murah, termokopel ini juga mempunyai jangkauan yang cukup tinggi. Pembaca sensor termokopel tipe K ini memiliki batas suhu antar -200 oC sampai +1200 oC. Termokopel ini berbahan dasar Chromel dan Alumel yang mempunyai sensitivitas rata-rata 41  $\mu\text{V/oC}$ . (Data sheet acquired from Harris Semiconductor. 2010)

Gambar sensor suhu dapat dilihat dalam Gambar 2.6 berikut:



*Gambar 2.6 Sensor Suhu Termokopel Type-K*

Sumber: Rachman A., (2016).

Termokopel adalah dua logam yang didekatkan yang apabila terpapar oleh kalor dengan suhu tertentu akan menghasilkan beda potensial. Termokopel Suhu didefinisikan sebagai jumlah dari energi panas dari sebuah objek atau sistem. Perubahan suhu dapat memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap proses ataupun material pada tingkatan molekul. Sensor suhu adalah device yang dapat melakukan deteksi pada perubahan suhu berdasarkan pada parameterparameter fisik seperti hambatan, ataupun perubahan voltage. Termokopel merupakan jenis logam yang berbeda disatukan salah satu ujungnya dan ujung tersebut dipanaskan maka akan timbul beda potensial pada ujung-ujung yang lain, hal ini diakibatkan oleh kecepatan gerak elektron dari dua material yang berbeda daya hantar panas sehingga mengakibatkan beda potensial (Rachman dkk, 2016).

## 2.6 Kontroler

Kontrol otomatis membandingkan nilai sebenarnya dari keluaran sistem secara keseluruhan dengan mengacu pada masukan (nilai yang dikehendaki), menentukan penyimpangan, dan menghasilkan sinyal kontrol yang akan mengurangi penyimpangan menjadi nol atau nilai yang terkecil (Ogata K., 1997). Selain itu analisis juga dilakukan untuk mengetahui bagaimana kecepatan sistem dalam merespon *input* dan peredamannya terhadap adanya lonjakan (*over shoot*) .

Suatu sistem dikatakan stabil, jika diberi gangguan maka sistem tersebut akan kembali ke keadaan *steady*, yaitu *output* berada dalam keadaan tetap seperti tidak ada gangguan. Sistem dikatakan tidak stabil, jika *output* berosilasi terus menerus ketika dikenai suatu gangguan. Karena suatu sistem pengendalian biasanya melibatkan penyimpanan energi maka *output* sistem ketika diberi suatu *input*, tidak dapat mengikuti *input* secara serentak, tapi

menunjukkan respons transien berupa suatu osilasi teredam sebelum mencapai *steady state*. Dalam sistem pengendalian terdapat 2 macam *loop*:

1. Pengendalian dengan *loop* terbuka

Sistem kontrol *loop* terbuka adalah sistem kontrol yang keluarannya tidak berpengaruh pada aksi pengontrolan. Jadi pada sistem kontrol *loop* terbuka, keluaran tidak diukur atau diumpan balik untuk dibandingkan dengan masukan.

2. Pengendalian dengan *loop* tertutup

Sistem kontrol *loop* tertutup adalah sistem kontrol yang keluarannya mempunyai pengaruh langsung pada aksi pengontrolan. Disebut juga sistem kontrol yang menggunakan umpan balik untuk memperkecil kesalahan sistem.

### 2.6.1 Kontroler Proporsional (P)

Kontroler dengan Kontrol Proporsional adalah sebuah kontrol yang memiliki karakteristik mempercepat respon. Secara lebih sederhana dapat dikatakan, bahwa keluaran kontrol proporsional merupakan perkalian antara konstanta proporsional dengan masukannya. Perubahan pada sinyal masukan akan segera menyebabkan sistem secara langsung mengubah keluarannya sebesar konstanta pengalinya. Hubungan antara keluaran kontrol  $m(t)$  dan sinyal kesalahan penggerak  $e(t)$  ditunjukkan dalam persamaan 2.3.

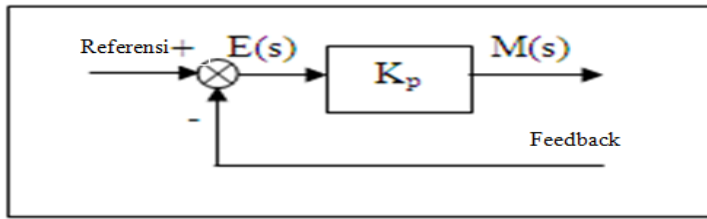
$$m(t) = K_p e(t) \quad (2.3)$$

atau, dalam besaran transformasi Laplace ditunjukkan dalam persamaan 2.4,

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \quad (2.4)$$

Di mana  $K_p$  adalah kepekaan proporsional atau penguatan.

Apapun wujud mekanisme yang sebenarnya dan apapun bentuk daya penggeraknya, kontrol proporsional pada dasarnya merupakan penguat dengan penguatan yang dapat diatur (Ogata K.,1997). Diagram blok kontrol proporsional ditunjukkan dalam Gambar 2.7



Gambar 2.7 Diagram Blok Kontrol Proporsional

Sumber: Ogata K., (1997).

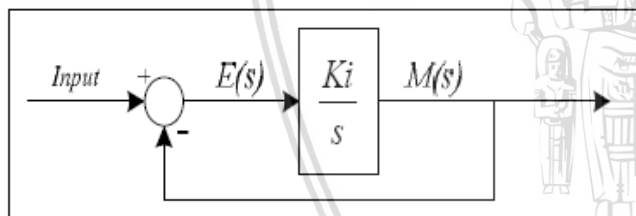
### 2.6.2 Kontroler Integral (I)

Kontroler integral memiliki arti bahwa *output* sebanding dengan kenaikan integral dari *input*. (Rusli M. 2015)

Pada kontroler integral, harga *output* kontroler  $m(f)$  diubah dengan laju yang sebanding sinyal *error* penggerak  $e(t)$ . Jadi:

$$\frac{dm(f)}{dt} = Ki e(t) \quad (2-5)$$

Jika harga  $e(t)$  diduakalikan, maka harga  $m(f)$  berubah dengan laju perubahan menjadi dua kali semula. Jika kesalahan penggerak nol, maka harga  $m(f)$  tetap stasioner. Kontroler integral seringkali disebut kontroler *reset* (Ogata K. 1997)



Gambar 2.8 Diagram Blok Kontrol Integral

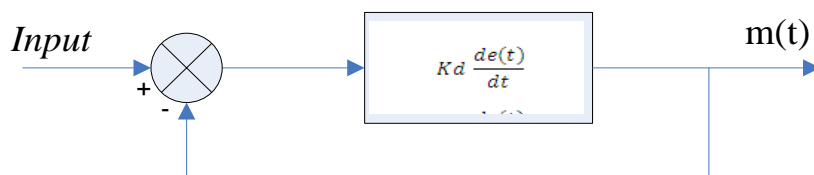
Sumber: Ogata K., (1997).

### 2.6.3 Kontroler Derivatif (D)

Kontrol ini digunakan untuk memperbaiki atau mempercepat respons transien sebuah sistem kontrol dengan cara memperbesar *phase lead* terhadap penguatan kontrol dan mengurangi *phase lag* penguatan tersebut (Ogata K.,1997). kontrol deferensial tidak dapat mengeluarkan *output* bila tidak ada perubahan *input*, selain itu kontrol deferensial tidak dapat digunakan untuk proses yang mengandung *noise*. Hubungan antara keluaran kontrol  $m(t)$  dan sinyal kesalahan penggerak  $e(t)$  dinyatakan dalam persamaan 2.6 :

$$\frac{M(s)}{E(s)} = Kd.s \quad (2.6)$$

$K_d$  adalah penguatan deferensial. Gambar 2.9 menunjukkan diagram blok kontrol deferensial.



Gambar 2.9 Diagram Blok Kontrol Deferensial

Sumber: Ogata K., (1997).

#### 2.6.4 Kontroler Proporsional Integral Derivatif (PID)

Gabungan kontrol proporsional, integral, dan differensial mempunyai keunggulan dibandingkan dengan masing-masing dari tiga kontrol tersebut. Masing – masing kontrol P, I, maupun D berfungsi untuk mempercepat reaksi sistem, menghilangkan *offset*, dan mendapatkan energy ekstra ketika terjadi perubahan *load*.

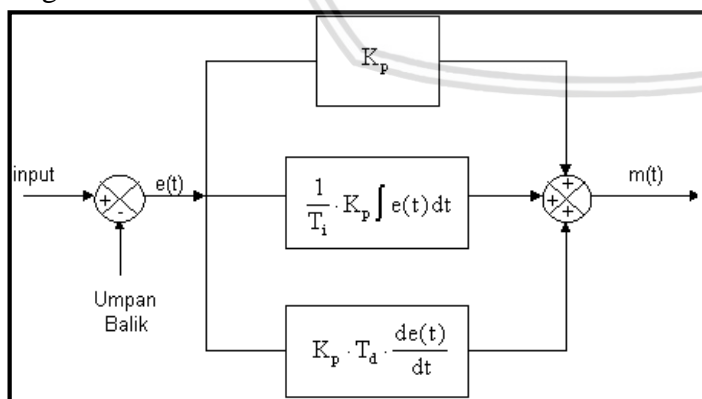
Persamaan kontrol PID ini dapat dinyatakan dalam persamaan 2.7 :

$$m(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.57)$$

Dalam transformasi Laplace dinyatakan dalam persamaan 2.8 :

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.8)$$

$T_i$  adalah waktu integral dan  $T_d$  adalah waktu derivatif. Gambar 2.10 menunjukkan diagram blok kontrol PID.

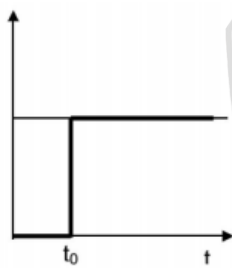


Gambar 2.10 Diagram Blok Kontrol PID

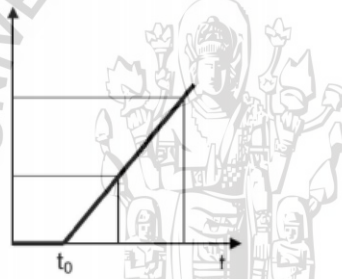
Sumber: Ogata K., (1997).

## 2.7 Respon Sistem

Salah satu cara untuk menguji dan menganalisis suatu sistem adalah dengan memberikan suatu sinyal uji (test signal) sebagai masukan dan mengamati serta menganalisis keluarannya. Sinyal fungsi step digunakan untuk menguji keandalan terhadap gangguan luar, dsb. Gambar 2.11 memberikan Gambaran contoh sinyal uji fungsi step dan fungsi ramp. Keluaran yang dihasilkan merupakan tanggapan (response) dari sistem yang diberikan sinyal uji. Bila analisa yang dilakukan merupakan analisa dalam lingkup waktu dan masukan yang diberikan bukan merupakan fungsi periodik (mempunyai frekuensi), maka analisa tersebut merupakan analisa tanggapan waktu (time response). Tanggapan waktu dari suatu sistem kontrol dibagi menjadi dua bagian : tanggapan transien (transient response) dan tanggapan keadaan tunak (*steady state*). Respon transien berlangsung dari saat mulai hingga respon sistem mencapai nilai akhir yang diinginkan (final state). Respon transien digunakan untuk menganalisis sifat naik atau permulaan dari suatu sistem bila diberikan sinyal uji.



(a) Grafik fungsi step

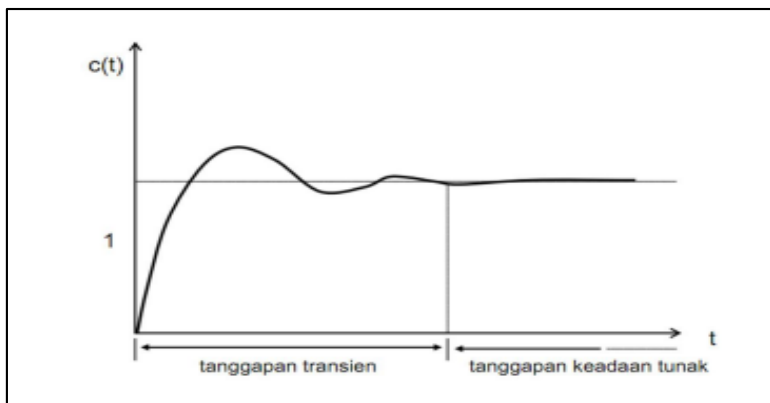


(b) Grafik Fungsi ramp

Gambar 2.11 Grafik fungsi input step dan ramp

Sumber: Ogata, K. (1997).

Respon keadaan tunak dimulai pada saat respon mulai pertama kali mendekati nilai akhir hingga waktu yang tak terhingga. Gambar 2.11 mendeskripsikan kedua jenis respon waktu tersebut. Respon keadaan tunak digunakan untuk menganalisis karakteristik sistem pada saat mencapai harga akhirnya.



Gambar 2.12 Respon transien dan respon keadaan tunak  
Sumber: Ogata, K. (1997).

### 2.7.1. Sistem Orde Satu

Fungsi alih sebuah sistem orde I dapat dituliskan sebagai berikut :

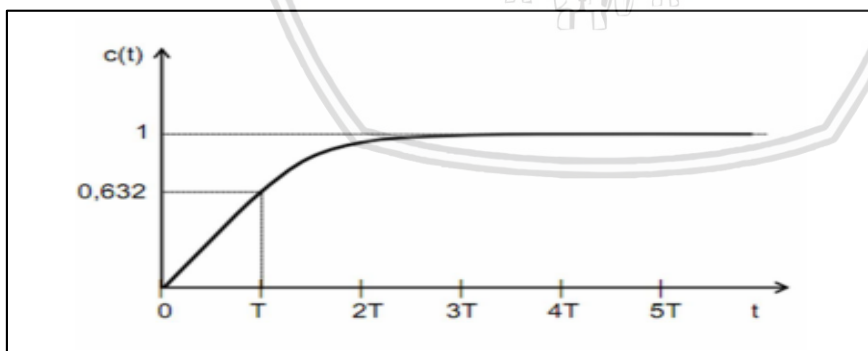
Dengan 
$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G}{Ts+1} \quad (2.9)$$

Keterangan :

$X(s)$  = fungsi masukan

$Y(s)$  = fungsi keluaran

Fungsi alih ini apabila diberikan masukan berupa fungsi step maka menghasilkan respon dengan karakteristik seperti dalam Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Respon sistem orde satu terhadap fungsi step

Sumber : Ogata, K. (1997 )

Dari grafik diatas diperoleh karakteristik :

1. Konstanta waktu yaitu ukuran waktu yang menyatakan kecepatan respon, yang di ukur mulai  $t = 0$  s/d respon mencapai 63,2% dari respon steady state.

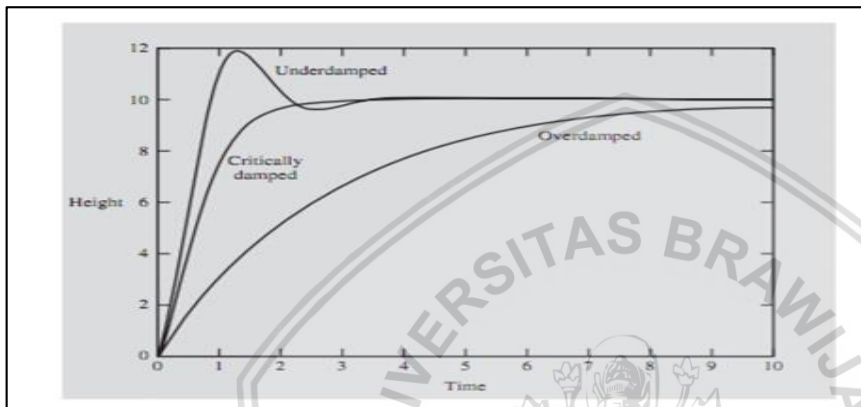


2. *Settling time* yaitu waktu yang dibutuhkan respon untuk mencapai nilai akhir dari respon dan tetap berada pada nilai tersebut.

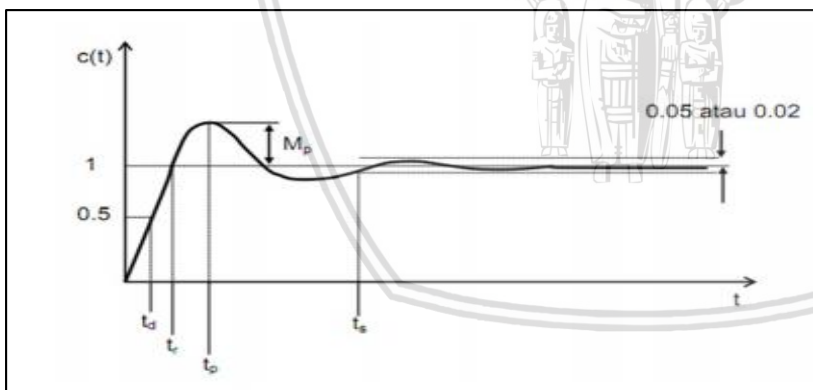
Untuk sebuah sistem orde II fungsi transfer dapat dituliskan sebagai berikut :

Dengan 
$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G}{As^2 + Bs + G} \quad (2.10)$$

Respon atau respon yang dihasilkan fungsi transfer ini dapat berbentuk *over damped*, *critically damped*, dan *under damped*



Gambar 2.14 Respon orde dua terhadap fungsi step  
Sumber: Ogata, K.(1997).



S

Dari grafik diatas diperoleh karakteristik :

1. *Settling time* yaitu waktu yang dibutuhkan respon untuk mencapai nilai akhir dari respon dan tetap berada pada nilai tersebut.
2. *Maximum overshoot* yaitu nilai puncak maksimum dari respon diukur dari nilai akhir dari respon. Biasanya dirumuskan dalam persentase :

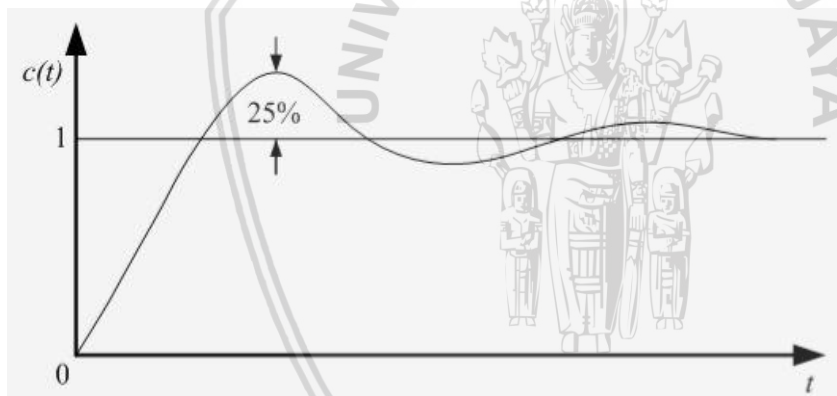
$$\% \text{ max overshoot} = \frac{\text{nilai puncak maks} \times \text{nilai steady state}}{\text{nilai steady state}} \times 100\%$$

## 2.8 Metode Ziegler Nichols

Parameter kendali PID untuk *plant* yang tidak diketahui model matematisnya dapat ditentukan dengan menerapkan tuning *Ziegler-Nichols*. (Jamal Z. 2015)

Metode *ziegler-nichols* dipublikasikan pada tahun 1942 oleh *John G Ziegler* dan *Nathaniels B Nichols* yang keduanya bekerja di *Taylor Instruments*. Menurut keduanya metode ini merupakan metode simpel yang dapat digunakan untuk memudahkan kalibrasi ulang pada sistem kontrol PID. Nilai parameter PID didapatkan dari kurva output yang dihasilkan dari sebuah sistem kerja ataupun mesin tunggal. Kurva ini nantinya digunakan untuk mengetahui besarnya nilai parameter PID yang dicari dengan cara menggambar garis singgung pada daerah transisi yang terlihat pada kurva. Metode ini terdiri atas 2 metode yaitu *open-loop* dan *close-loop*. (Agung R. H., dkk 2017)

Terdapat dua metode yang disebut dengan aturan penalaan Ziegler-Nichols, pada kedua metode tersebut memiliki tujuan yang sama yaitu untuk mencapai 25% *maximum overshoot* pada respon unit step, ditunjukkan dalam Gambar 2.16.

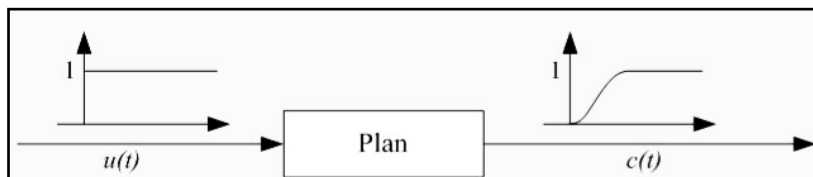


Gambar 2.16 Kurva Respon Unit Step yang Menunjukkan 25% Maximum Overshoot  
Sumber: Ogata, K. (1997).

### 1. Metode Pertama

Metode pertama atau sering disebut metode kurva reaksi, respon dari plan dapat diperoleh secara eksperimental dengan masukan berupa unit step.

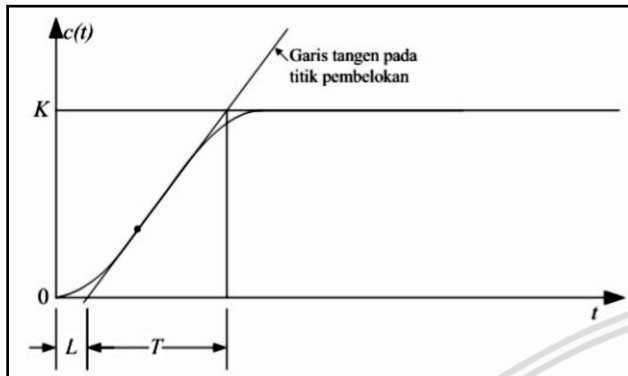
Gambar respon plant terhadap masukan berupa unit step dapat dilihat dalam Gambar 2.17 berikut:



Gambar 2.17 Respon Plant Terhadap Masukan Berupa Unit Step  
Sumber: Ogata K. (1997).

Jika dalam plan tersebut terdapat integrator atau *dominan complex-conjugate poles*, maka kurva respon unit step berbentuk seperti huruf S, jika respon tidak memberikan bentuk kurva S, maka metode ini tidak berlaku. (Ogata K. 1997)

Gambar kurva respon yang berbentuk S dapat dilihat dalam Gambar 2.18 berikut:



Gambar 2.18 Kurva Respon yang Berbentuk S  
Sumber: Ogata K. (1997)

Kurva berbentuk S tersebut dapat dikarakteristikkan menjadi dua konstanta yaitu waktu tunda  $L$  dan konstanta waktu  $T$ . Waktu tunda dan konstanta waktu ditentukan dengan menggambar sebuah garis tangen pada titik pembelokan dari kurva S, dan menentukan perpotongan antara garis tangen dengan sumbu waktu  $t$  dan sumbu  $c(t) = K$ , seperti yang telah ditunjukkan dalam Gambar 2.18 Fungsi alih  $C(s)/U(s)$  dapat dilakukan pendekatan dengan sistem orde satu (Ogata, K. 1997). Persamaan ditunjukkan pada persamaan 2.9. berikut:

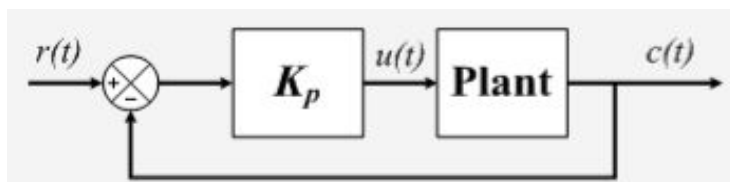
$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts+1} \quad (2-9)$$

*Ziegler dan Nichols* menyarankan untuk menentukan nilai-nilai dari  $K_p$ ,  $T_i$  dan  $T_d$  berdasarkan pada formula yang ditunjukkan dalam Tabel 2.2. (Ogata K. 1997)

## 2. Metode Kedua

Dalam metode kedua *ziegler-nichols*, mula-mula yang dilakukan adalah membuat  $T_i = \infty$  dan  $T_d = 0$ . Kemudian hanya dengan menggunakan tindakan kontrol proporsional, harga ditingkatkan dari nol ke suatu nilai kritis  $K_{cr}$ , disini mula-mula keluaran memiliki osilasi yang berkesinambungan (Jika keluaran tidak memiliki osilasi berkesinambungan untuk nilai  $K_p$  manapun yang telah diambil, maka metode ini tidak berlaku). Dari keluaran yang berosilasi secara berkesinambungan, penguatan kritis  $K_{cr}$  dan periode  $P_{cr}$  dapat ditentukan.

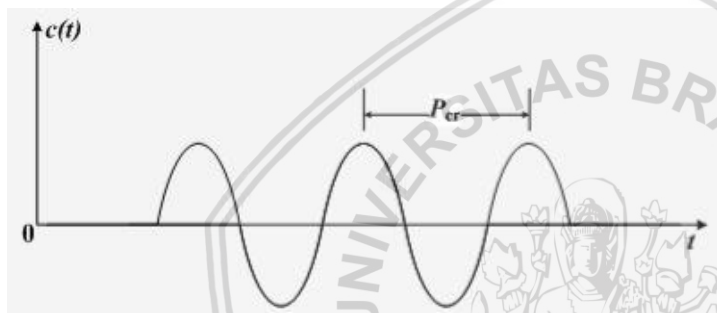
Diagram blok sistem loop tertutup dengan kontrol proporsional ditunjukkan dalam Gambar 2.19 dan untuk osilasi berkesinambungan dengan periode  $P_{cr}$  ditunjukkan dalam Gambar 2.14



Gambar 2.19 Sistem Loop Tertutup dengan Kontrol Proporsional

Sumber: Ogata, K., (1997)

Gambar kurva respon unit step dapat dilihat dalam Gambar 2.20 berikut:



Gambar 2.20 Osilasi Berkesinambungan dengan Periode  $P_{cr}$

Sumber: Ogata K. (1997)

Ziegler dan Nichols menyarankan penyetelan nilai parameter  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  dan berdasarkan rumus yang diperlihatkan dalam Tabel 2.2. (Ogata, K., 1997)

Tabel 2.3 Aturan Penalaan Ziegler-Nichols Berdasarkan Respon Unit Step dari Plant

Type Kontroler	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0,5 L$

## 2.9 Kestabilan Sistem

Kriteria *stability* yang ditemukan oleh *E.J.Routh* dan *A.Hurwitz* merupakan kriteria yang penting dan handal diterapkan dalam analisa stabilitas suatu sistem linier. Kriteria *Routh-Hurwitz* didasarkan pada pengurutan koefisien persamaan karakteristik suatu sistem

transfer function  $G(s) = p(s)/q(s)$  dengan persamaan karakteristik. Kriteria Hurwitz dapat digunakan untuk mengetahui *instabilitas* sistem, tapi tidak cukup untuk memastikan stabilitas sistem. Kriteria *Routh-Hurwitz* adalah metode yang efektif untuk menguji kestabilan sistem. Definisi kestabilan sistem :

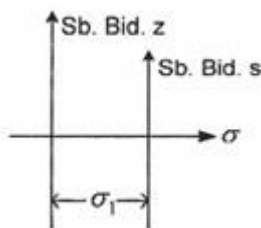
1. Stabil, jika *respon* sistem mempunyai harga tertentu pada saat waktu mendekati tak hingga walaupun sistem mempunyai kesalahan.
2. Tidak stabil, jika *respon* sistem mendekati tak hingga saat waktu mendekati tak hingga.
3. Stabil marginal, jika *respon* sistem tetap/konstan atau berosilasi teratur. (Yudaningtyas, E. 2017)

Bagian lain dari konsep kestabilan adalah berupa sistem linear yang dikarakteristikan sebagai berikut :

1. Stabil absolute, apabila harga dari semua parameter sistem stabil.
2. Stabil kondisional, apabila harga dari semua parameter sistem konstan / stabil pada daerah kurva/lengkung tertentu.

### 2.9.1 Analisis Kestabilan Relatif

Suatu sistem dinyatakan berkondisi stabil, apabila kita dapat menentukan kestabilan relatif secara kuantitatif setelah menentukan tempat kedudukan akar-akar persamaan karakteristik sistemnya yang cenderung tetap. Waktu penetapan (*setting time*) akan berbanding terbalik terhadap harga riil dari akar-akar yang dominant tetap tadi. Kestabilan relatif dapat ditentukan oleh semua akar-akar yang diperiukan dari persamaan karakteristik yang lebih negatif dari pada harga yang telah ditentukan. Misalnya, kedudukan akar harus berada pada bidang  $s = -\sigma$  ( $\sigma > 0$ ). Persamaan karakteristik sistem yang ditinjau ini selanjutnya dimodifikasi dengan cara menukar bidang  $-s$  yang asli (awal) menjadi  $s = -\sigma_1$ , diganti  $s = z - \sigma_1$  ditunjukkan dalam Gambar 2.21.



Gambar 2.21 Pergeseran/Penggantian Sumbu Bidang S Menjadi Sumbu Z

Jika persamaan karakteristik sistem yang baru pada sb.  $z$  benar-benar cocok (memenuhi kriteria) dari Routh, hal ini berarti bahwa akar-akar dari persamaan karakteristik yang asli (awal) adalah lebih negative dari  $-\sigma_1$ .







### BAB III

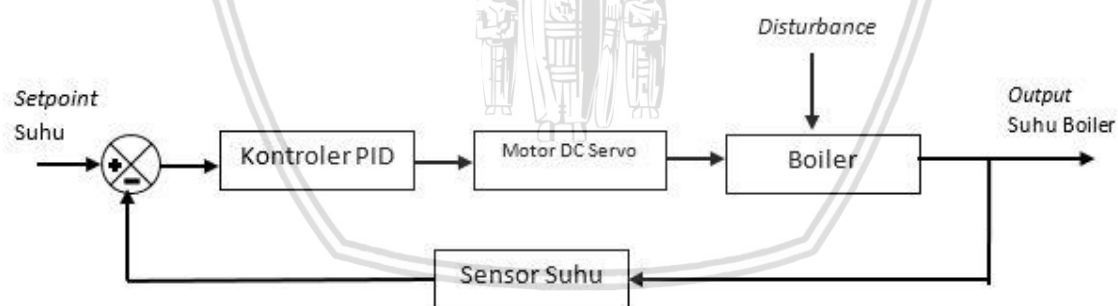
#### METODE PENELITIAN

Metode penelitian pada dasarnya merupakan cara ilmiah untuk mendapatkan informasi dengan tujuan dan manfaat tertentu. Metode penelitian disini berfungsi agar tujuan penelitian yang terdapat di bab pendahuluan maka diperlukan langkah-langkah untuk menyelesaikan masalah tersebut. Metode yang digunakan diuraikan sebagai berikut:

1. Perancangan diagram blok
2. Spesifikasi alat
3. Karakterisasi setiap blok
4. Pembuatan perangkat keras
5. Perancangan *flowchart* program utama.

#### 3.1 Perancangan Diagram Blok Sistem

Pada perencanaan alat diperlukan perencanaan blok diagram sistem yang dapat menjelaskan sistem secara garis besar dan diharapkan alat dapat bekerja sesuai dengan rencana diagram blok sistem. Diagram blok sistem dapat dilihat dalam Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Blok Sistem

Keterangan :

1. *Setpoint* : nilai masukan sistem yang diinginkan pada keluaran sistem. Pada pengujian kali ini berupa suhu pada *boiler* dengan suhu 100°C.
2. Kontroler yang digunakan adalah kontroler *Proporsional Integral Derivatif* (PID) menggunakan perangkat keras Arduino UNO.
3. *Plant* yang digunakan adalah *boiler*.

4. Gangguan pada *plant* adalah penambahan air pada tabung *boiler*.
5. Sensor suhu yang digunakan sebagai pembaca suhu *boiler* adalah termokopel type-k.
6. *Output* merupakan respon keluaran *plant*.

### 3.2 Spesifikasi Alat

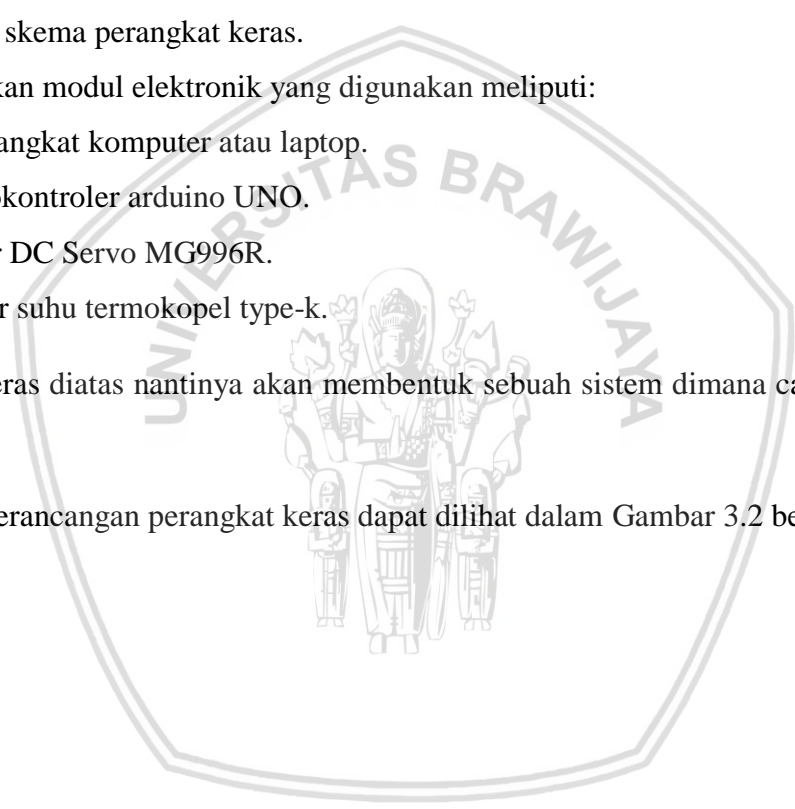
Pembuatan perangkat keras dilakukan sebagai langkah awal sebelum terbentuknya suatu sistem, hal ini dimaksudkan agar pengendali suhu pada *boiler* dengan kontroler PID dapat berjalan sesuai deskripsi awal yang dirancang.

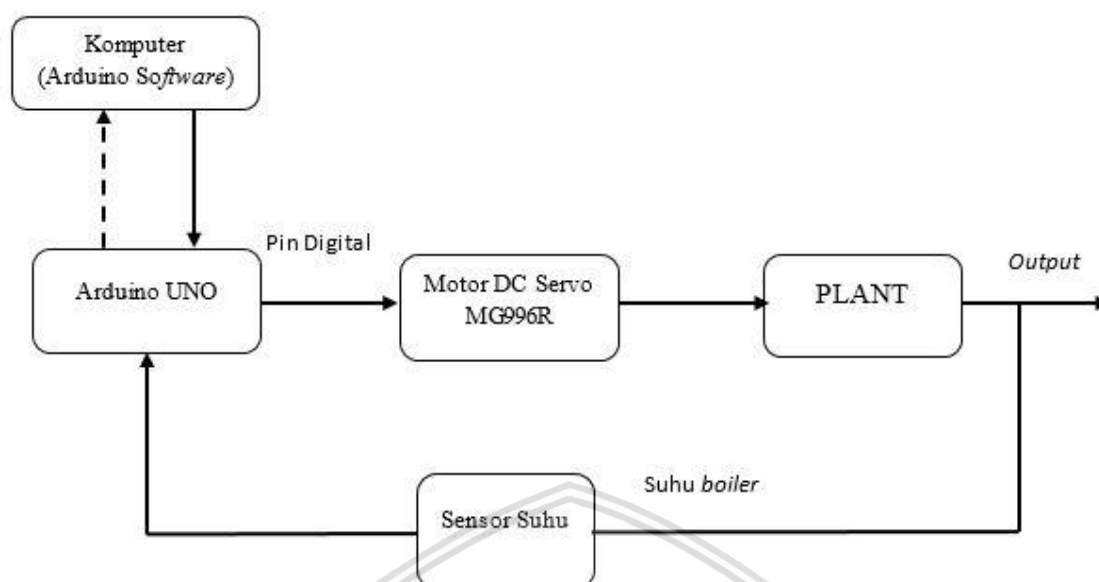
Langkah-langkah dalam pembuatan perangkat keras adalah sebagai berikut:

1. Membuat skema perangkat keras.
2. Menentukan modul elektronik yang digunakan meliputi:
  - a. Seperangkat komputer atau laptop.
  - b. Mikrokontroler arduino UNO.
  - c. Motor DC Servo MG996R.
  - d. Sensor suhu termokopel type-k.

Perangkat keras diatas nantinya akan membentuk sebuah sistem dimana cara kerjanya sebagai berikut:

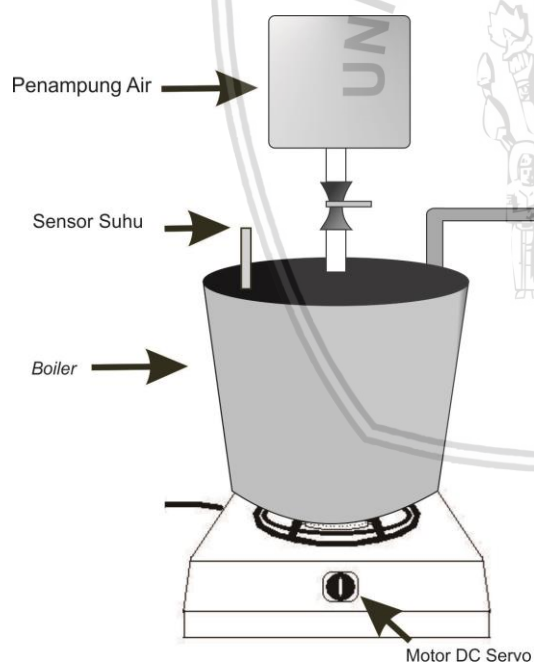
Gambar skema perancangan perangkat keras dapat dilihat dalam Gambar 3.2 berikut:





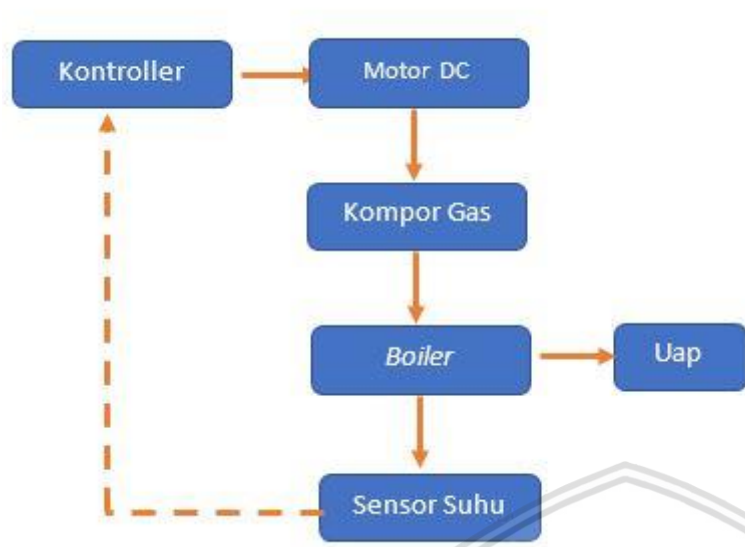
Gambar 3.2 Skema Perancangan Perangkat Keras

Gambar Skema perancangan *boiler* dapat dilihat dalam Gambar 3.3 berikut:



Gambar 3.3 Skema Perancangan *boiler*

Gambar rancangan sistem dapat dilihat dalam Gambar 3.4 berikut:



Gambar 3.4 Rancangan Sistem

Penjelasan mengenai rancangan sistem diatas sebagai berikut:

1. Menyusun rangkaian seperti Gambar 3.4.
2. Menggunakan kontroler yang berfungsi sebagai pengatur suhu secara otomatis berdasarkan hasil pembacaan sensor termokopel type-k.
3. Kontroler mengirimkan sinyal pembacaan ke dalam Motor DC Servo MG996R yang sudah dikopel pada tuas kompor gas *portable*.
4. Kompor gas *portable* digunakan sebagai pemanas *boiler*.
5. *Boiler* berfungsi sebagai *vaporizer* dimana perubahan zat cair menjadi gas terjadi. *Boiler* memanaskan air sehingga mencapai titik didihnya.
6. Uap adalah hasil keluaran dari *boiler* yang berupa gas. Uap ini akan dilewatkan melalui selang sebagai media penyambung antara *vaporizer* (perubahan wujud dari cair menjadi gas).
7. Selanjutnya uap dari *boiler* akan keluar melewati nosel.
8. Suhu yang dihasilkan *boiler* akan mempengaruhi kinerja sistem.

### 3.3 Karakterisasi Setiap Blok

Setelah semua komponen pada alat sudah sesuai diagram blok sistem yang telah dirancang dan perangkat lunak (*software*) untuk mendukung blok sistem yang telah dibuat, maka diadakan pengujian dan analisis alat :

1. Pengujian sistem pada tiap-tiap blok.

2. Menggabungkan sistem dari beberapa blok menjadi keseluruhan sistem.
3. Mengevaluasi hasil pengujian sistem keseluruhan.

### 3.3.1 Pengujian Sensor Termokopel type-k

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui keberhasilan dari modul sensor termokopel type-k yang digunakan untuk mendeteksi perubahan suhu pada *boiler*.

Peralatan yang digunakan adalah :

1. Sensor termokopel type-k
2. Arduino UNO R3
3. Laptop yang sudah terinstall *software* arduino IDE
4. Kabel penghubung.

Adapun langkah-langkah saat melakukan pengujian sensor termokopel type-k adalah sebagai berikut :

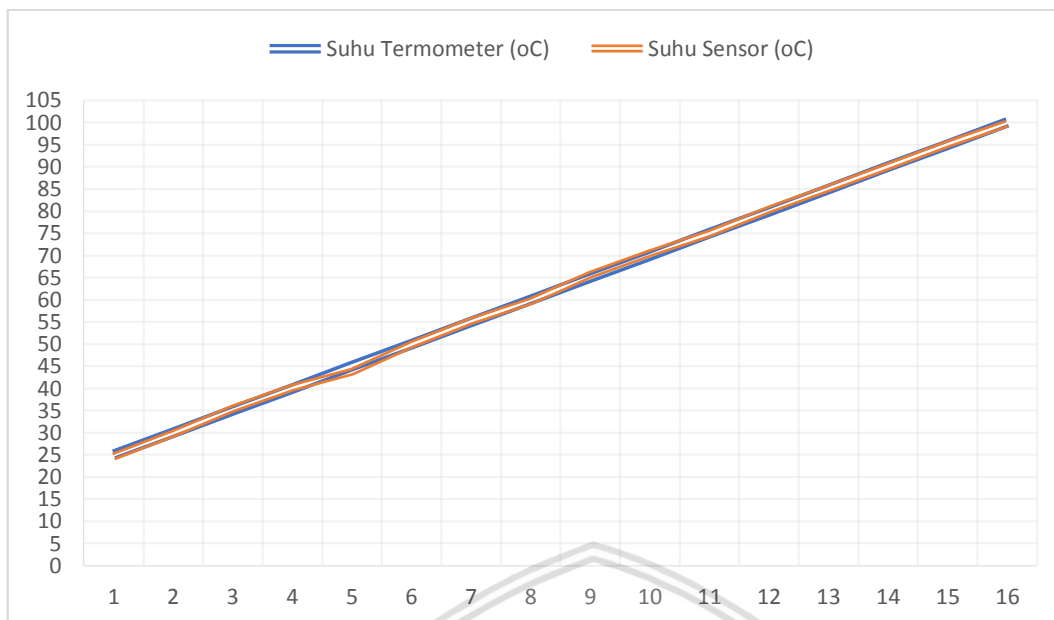
1. Menghubungkan sensor termokopel type-k dengan Arduino UNO R3, dilanjutkan menghubungkan arduino UNO R3 dengan laptop.
2. Meng-*upload* program dan menjalankan *serial monitor* dari sensor termokopel type-k.
3. Mengamati dan mencatat nilai keluaran yang terbaca pada *serial monitor*.

Hasil dari pengujian dapat dilihat dalam Tabel 3.1 dan perbandingan grafik antara kedua suhu dapat dilihat dalam Gambar 3.5 sebagai berikut:

Tabel 3.1 Perbandingan Suhu

Suhu Termometer (°C)	Suhu Pembacaan Sensor (°C)	ERROR
25	24,6	0,4
30	29,8	0,2
35	34,4	0,6
40	39,5	0,5
45	44,8	0,2
50	49,9	0,1
55	54,2	0,8
60	60,2	1,2
65	64,7	0,3
70	69,5	0,5
75	74,9	0,1
80	79,9	0,1
85	84,8	0,2
90	89,8	0,2
95	94,9	0,1
100	99,8	0,2
Rata-Rata Error		0,36

Berdasarkan hasil pengujian dalam Tabel 3.1, *error* antara suhu pembacaan termometer dengan suhu pembacaan *serial monitor* adalah sekitar 0,36° C. Grafik perbandingan suhu hasil pembacaan termometer acuan dengan *serial monitor* dapat dilihat dalam Gambar 3.5 Dalam grafik tersebut terlihat bahwa selisih yang timbul antara kedua pembacaan suhu cenderung membentuk garis linear.



Gambar 3.5: Grafik hasil perbandingan pembacaan data sensor termokopel type-k

### 3.3.2 Pengujian Motor DC Servo MG996R

Pengujian Motor DC Servo MG996R bertujuan untuk mengetahui kinerja dari Motor DC Servo MG996R dengan membandingkan keluaran sudut Motor DC Servo MG996R dengan keluaran sudut pada tuas kompor portible. Peralatan yang digunakan adalah sebagai berikut:

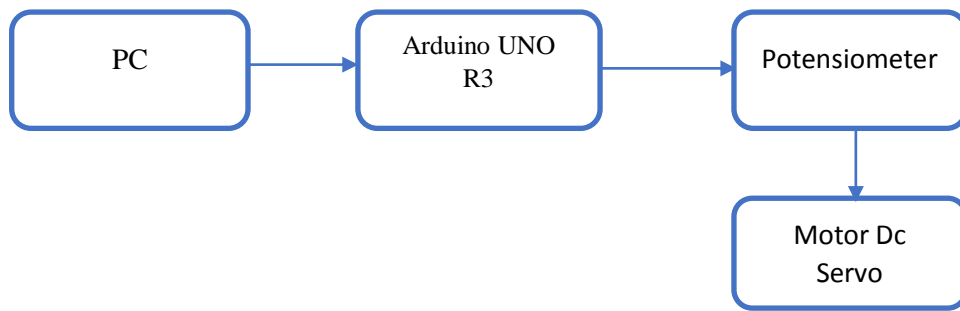
1. Motor DC Servo MG996R,
2. Arduino UNO R3,
3. Laptop yang sudah terinstall *software* arduino IDE,
4. Kabel penghubung.
5. Potensiometer

Adapun langkah-langkah saat melakukan pengujian Motor DC Servo MG996R adalah sebagai berikut:

1. Menyusun rangkaian seperti Gambar 3.6



2.



Gambar 3.6 Rangkaian Pengujian Motor DC Servo MG996R

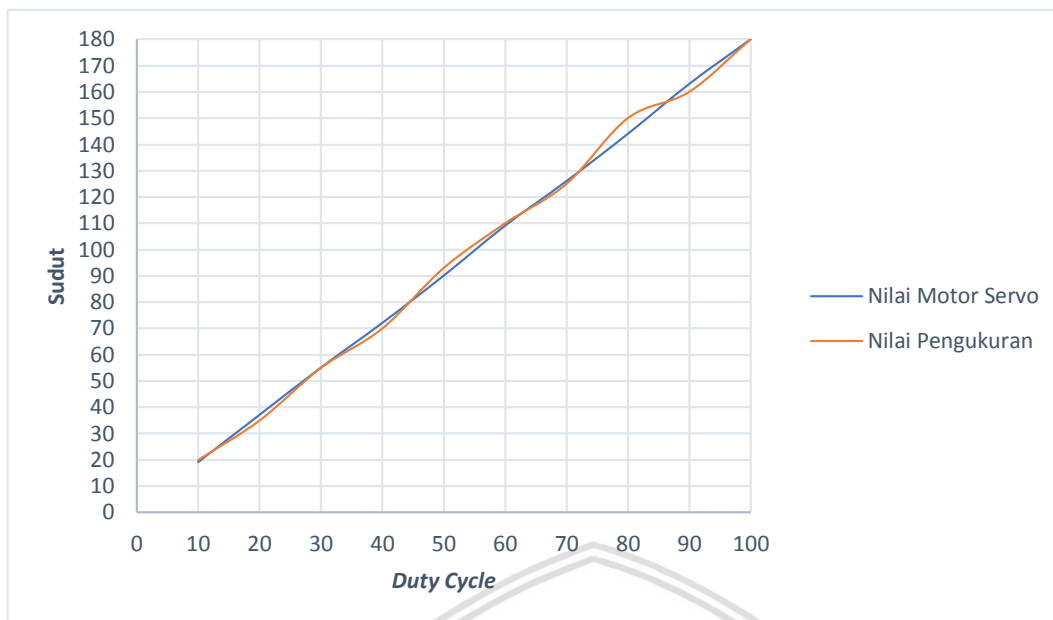
3. Menghubungkan Arduino UNO R3 ke dalam PC.
4. Membuat program pengontrolan driver pada software Arduino UNO R3.
5. Percobaan dengan menganalisa putaran sudut Motor DC Servo MG996R dengan sudut asli menggunakan papan ukur yang sudah dibuat.
6. Mengamati dan mencatat hasil dari sudut Motor DC Servo dengan Sudut dari papan ukur.

Hasil pengujian Motor DC Servo MG996R dapat dilihat dalam Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Hasil Pengujian Motor DC Servo MG996R

<i>Duty Cycle</i>	Nilai Sudut Motor DC Servo MG996R (°)	Nlai Sudut dari Papan Ukur (°)
10	19	20
20	37	35
30	55	55
40	72	70
50	90	93
60	109	110
70	126	125
80	144	150
90	163	160
100	180	180

Untuk hasil perbandingan dapat dilihat dalam Gambar 3.7 sebagai berikut.



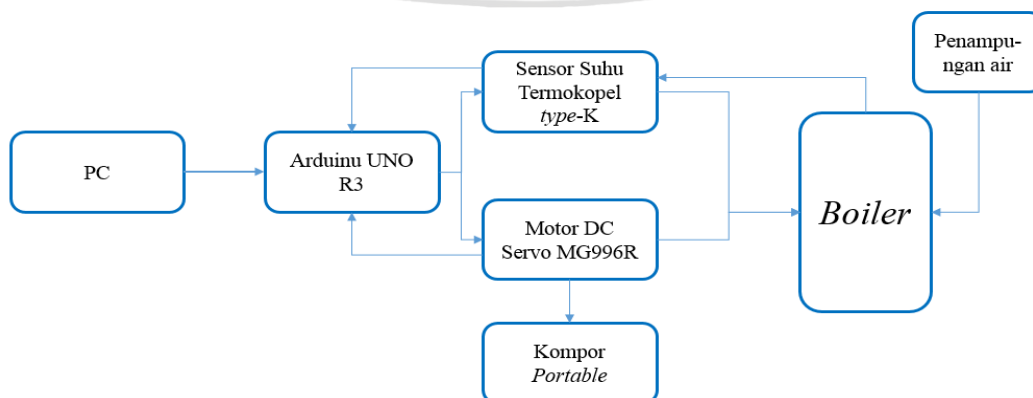
Gambar 3.7 Perbandingan Nilai Keluaran Sudut

### 3.3.3 Karakteristik *Plant*

Karakteristik *plant* yang berupa *boiler* dilakukan untuk mengetahui *plant*. Peralatan yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. PC atau Laptop
2. Kabel penghubung
3. Arduino UNO R3
4. *Plant* berupa *boiler*.
5. Kompor portable yang sudah di-*cople* dengan Motor DC Servo MG996R.
6. Sensor suhu termokopel type K.

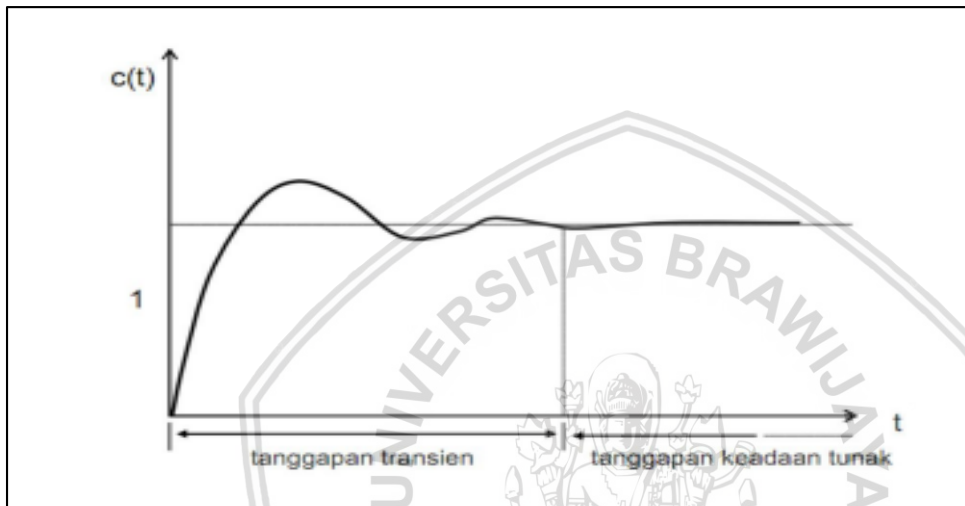
Langkah-langkah saat melakukan karakteristik *plant* adalah sebagai berikut :



Gambar 3.8 Rangkaian Pengujian Karakteristik *Plant*

1. Menyusun rangkain seperti Gambar 3.8.
2. Menghubungkan dengan semua perangkat dan pastikan semua terhubung dan tidak ada gangguan.
3. Respon suhu akan ditampilkan pada serial monitor.

Gambar 3.9, merupakan grafik karakteristik plant untuk memenuhi syarat *Ziegler-Nichols* yaitu dengan nilai *overshoot* yang kedua adalah sebesar  $\frac{1}{4}$  nilai dari *overshoot* yang pertama atau *Quarter Delay Respon* dari metode *Ziegler-Nichols*.



Gambar 3.9 Respon Ziegler-Nichols.

### 3.4 Pembuatan Perangkat Keras

Pembuatan perangkat keras dilakukan sebagai langkah awal sebelum terbentuknya suatu sistem beserta pemrogramannya. Hal ini agar pemodelan pada sistem pengendalian suhu pada *boiler* menggunakan kontrol PID dapat berjalan sesuai dengan deskripsi awal yang telah direncanakan.

1. Skema pembuatan perangkat keras.
2. Penentuan modul elektronik yang digunakan meliputi:
  - Mikrokontroler Arduino UNO sebagai perangkat kontroler.
  - Sensor termokopel *type-K* sebagai *feedback* suhu.
  - Motor DC Servo MG996R sebagai penggerak tuas kompor pemanas.

### 3.5 Perancangan Algoritma

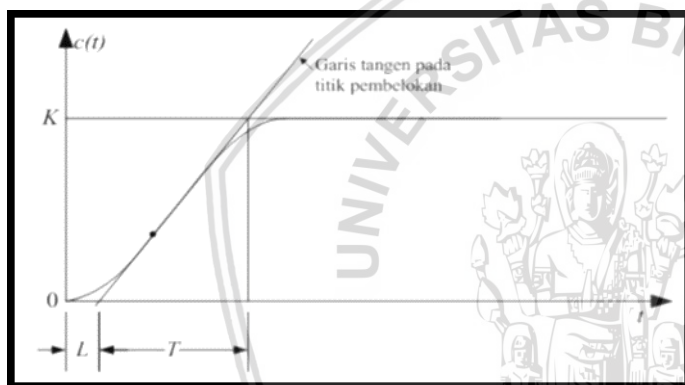
Dalam perancangan perangkat lunak, hal pertama yang harus dilakukan adalah mengetahui karakteristik sistem dari *boiler*. Setelah itu, dilakukan perhitungan dan percobaan untuk menentukan algoritma kontrol PID. Setelah didapatkan algoritma,

kemudian dibuat program untuk mikrokontroler dengan *software* program Arduino. Perancangan algoritma melalui beberapa tahap berikut.

### 3.5.1 Perancangan Kontrol PID

Dalam memenuhi tujuan performansi loop yang diinginkan, maka perlu ditambahkan kontroler dalam sistem. Kontrol yang dipilih adalah kontrol Proporsional Integral Derivatif. Kontroler PID dipilih karena karakteristik *plant* alat ini membutuhkan kontrol yang cepat..

*Ziegler dan Nichols* mengemukakan aturan-aturan untuk menentukan nilai dari gain proporsional  $K_p$ , waktu integral  $T_i$ , dan waktu derivatif  $T_d$  berdasarkan karakteristik respon transien dari *plant* yang diberikan. Penentuan parameter kontroler PID atau penalaan kontroler PID tersebut dapat dilakukan dengan bereksperimen dengan *plan* (Ogata, K., 1997). Pada pengerjaan skripsi ini digunakanlah metode *Ziegler Nichols* yang pertama sehingga mendapatkan sinyal kurve S seperti pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Kurva Respon yang Berbentuk S (Ogata, K. 1997)

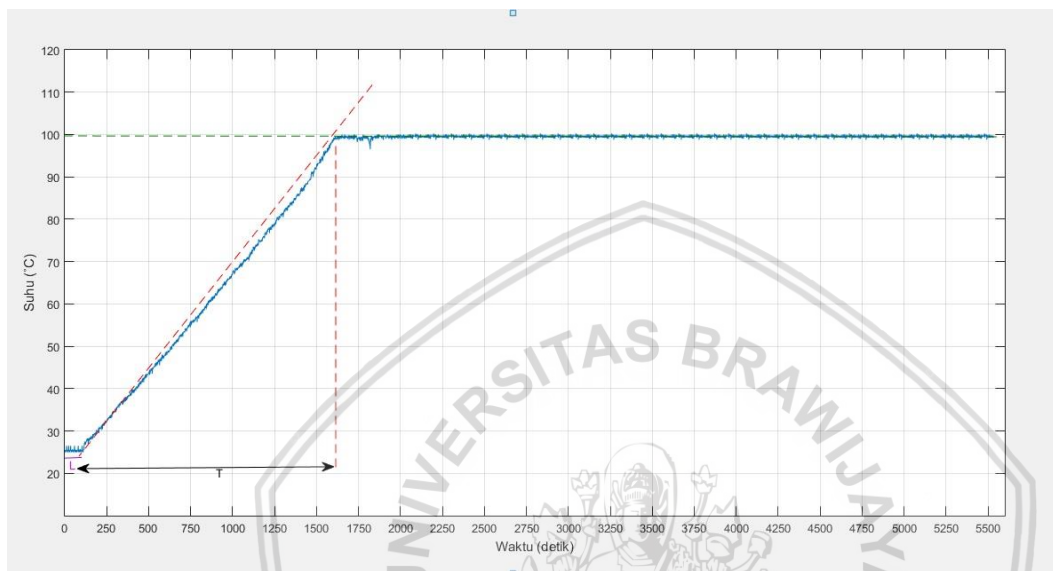
Grafik karakteristik *plant* dalam Gambar 3.10 menunjukkan bahwa bentuk kurva karakteristik *plant* menyerupai huruf S (*S-shaped curve*) sehingga dapat digunakan tuning  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  menggunakan metode 1 Ziegler-Nichols.

Langkah menentukan *tuning* parameter dengan metode 1 *Ziegler-Nichols* adalah sebagai berikut:

1. Menarik garis *tangent* pada titik infleksi pada grafik karakteristik *plant* seperti pada Gambar 3.10
2. Menentukan perpotongan garis *tangent* terhadap sumbu waktu  $t$  untuk mendapatkan nilai  $L$ .
3. Menentukan perpotongan garis *tangent* terhadap sumbu *steady* untuk mendapatkan nilai  $T$ .
4. Setelah mendapatkan nilai  $L$  dan  $T$  kemudian menentukan nilai  $K_p$ ,  $T_i$  dan  $T_d$  sesuai ketentuan pada Tabel 3.3

Tabel 3. 3 Aturan Metode 1 Ziegler-Nichols (Ogata K, 1997)

Tipe Kontrol	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0,5 L$

Gambar 3.11 Grafik Penentuan  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ 

Diperoleh nilai  $T$  dan  $L$  sebagai berikut:

$$L = 114 \text{ s}$$

$$T = 1544 \text{ s}$$

Diperoleh nilai  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  sebagai berikut:

$$K_p = 1,2 \times \frac{T}{L} = 1,2 \times \frac{1544}{114} = 13,54$$

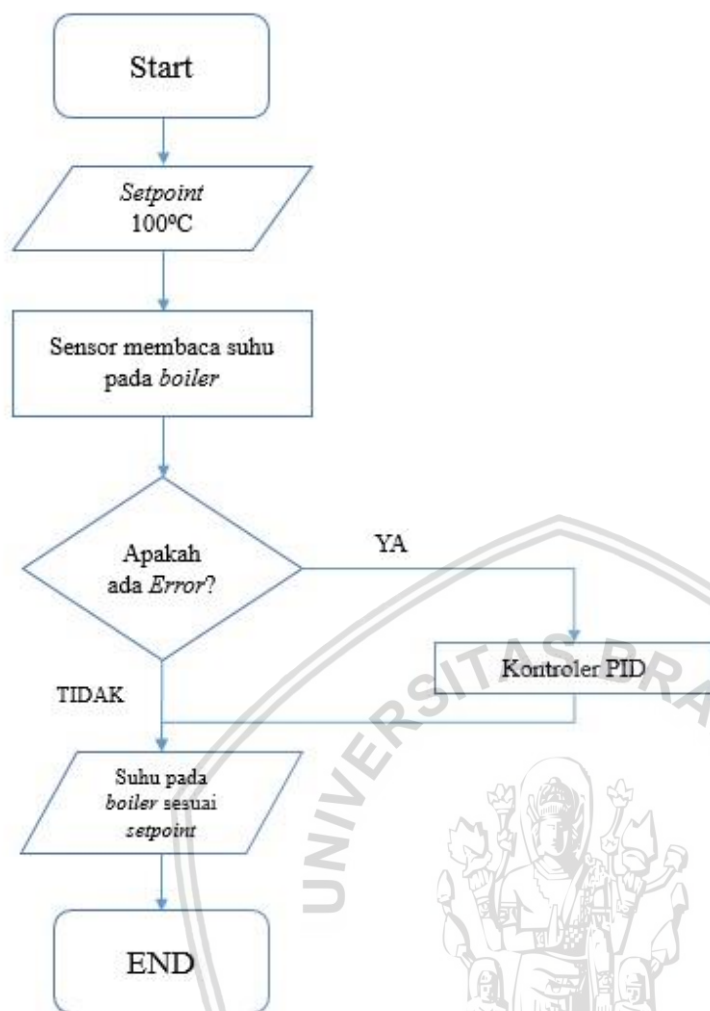
$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{13,54}{2 \times L} = \frac{13,54}{2 \times 114} = 0,059$$

$$K_d = K_p \times T_d = 13,54 \times (0,5 \times 114) = 13,54 \times 57 = 771,78$$

Berdasarkan perhitungan diatas diperoleh nilai  $K_p=13,54$ ,  $K_i=0,059$ ,  $K_d=771,78$ .

### 3.6 Perancangan Flowchart Program Utama

Berdasarkan diagram blok perancangan alat yang telah disusun, perancangan perangkat lunak meliputi perancangan bahasa C pada Arduino dapat dilihat dalam Gambar 3.12, sebagai berikut:



Gambar 3.12 Flowchart Program Utama





## BAB IV

### Hasil dan Pembahasan

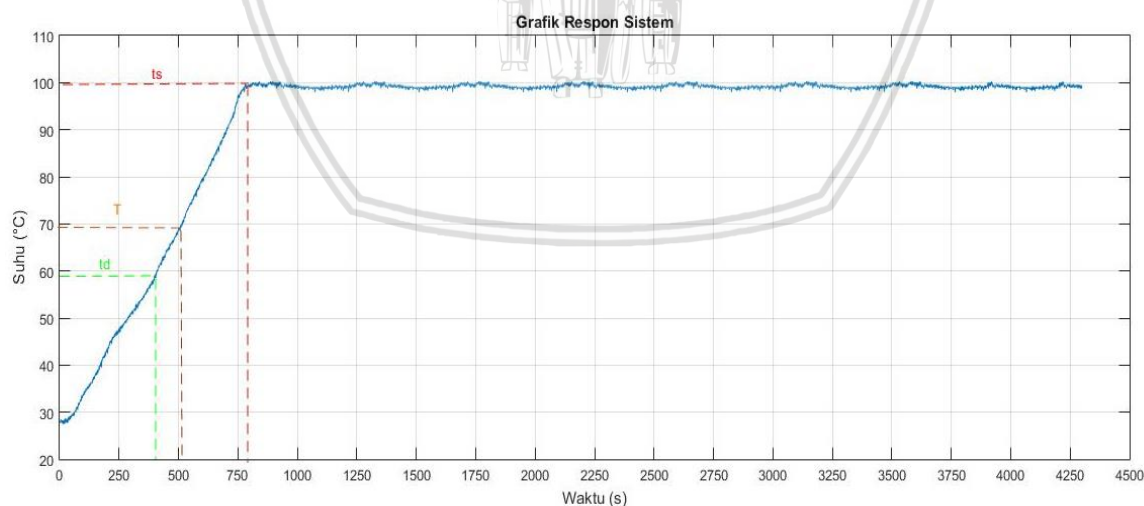
Hasil dan pembahasan diperoleh melalui pengujian sistem secara menyeluruh dan perbandingan hasil. Pengujian sistem secara menyeluruh dilakukan dengan *setpoint* 100°C dan diberikan dua gangguan, yaitu pertama dengan diberi gangguan penambahan air sebanyak satu liter, dan yang kedua diberikan tambahan air sebanyak dua liter. Percobaan dilakukan dengan menggunakan fungsi keanggotaan nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  yang telah ditentukan. Tujuan dilakukannya pengujian adalah untuk menguji apakah sistem hasil perancangan sudah sesuai dengan spesifikasi desain yang diinginkan serta untuk mengetahui responnya. Dalam pengujian kali ini air yang dipakai dalam *boiler* sebanyak 7 liter air. Pelaksanaan pengujian dan hasil dari pengujian dijelaskan seperti dibawah ini,yaitu:

#### 4.1 Pengujian Keseluruhan Sistem

Pengujian dilakukan untuk mengetahui bagaimana kinerja sistem secara keseluruhan dan mengamati respon kontroler terhadap *setpoint* 100°C.

##### a. Hasil Pengujian

Setelah melakukan prosedur pengujian, didapatkan hasil keluaran berupa grafik pembacaan suhu. Grafik hasil pengujian bisa dilihat dalam Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Gambar Respon Sistem

Berdasarkan hasil pengujian dalam Gambar 4.1 respon sistem keseluruhan, diperoleh kinerja sistem antara lain:

- $t_d$  (waktu tunda) yaitu waktu ketika suhu belum naik karena pemanas masih dalam proses pemanasan.  $t_d$  berdasarkan pengujian adalah 406 detik.
- $t_s$  (*settling time*) yaitu waktu yang diperlukan sistem untuk mencapai nilai akhir ketika *steady*.  $t_s$  berdasarkan pengujian adalah 812 detik. Settling time didapat ketika suhu telah mencapai 100°C
- *Error Steady State* :

$$\%Ess = \left| \frac{\text{Setpoint} - \text{present value}}{\text{setpoint}} \right| \times 100\%$$

$$\%Ess = \left| \frac{100 - 100,25}{100} \right| \times 100\%$$

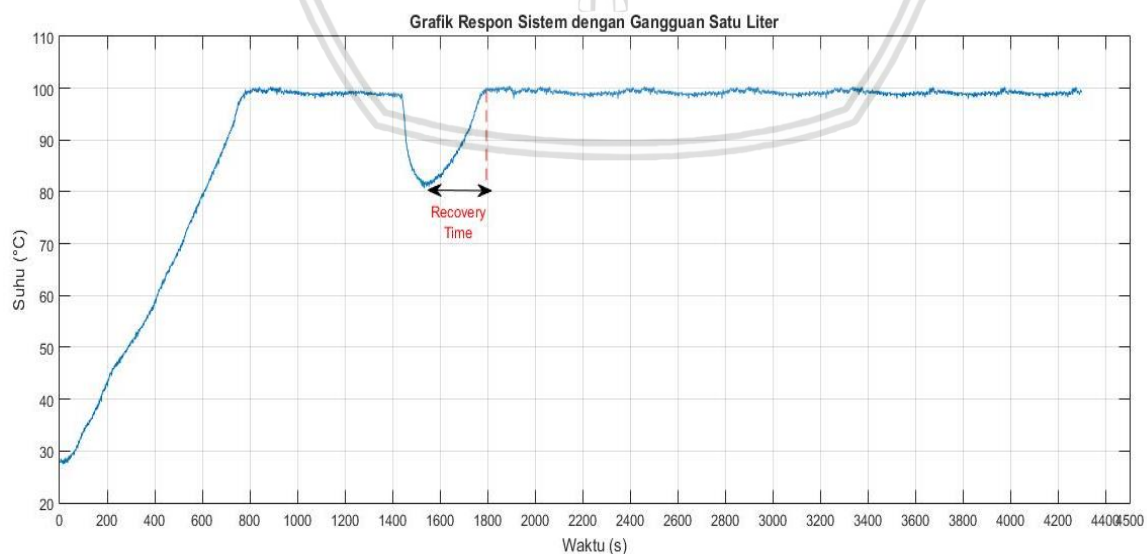
$$\%Ess = 1,23 \%$$

## 4.2 Pengujian Keseluruhan Sistem dengan diberikan Gangguan

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana kinerja sistem secara keseluruhan dan mengamati respons kontroler terhadap *setpoint* ketika mendapatkan gangguan berupa perubahan suhu yang turun. Pada pengujian ini ada dua tahap yaitu yang pertama dengan diberi gangguan satu liter dan yang kedua adalah sebanyak dua liter.

### 4.2.1 Pengujian dengan Gangguan Penambahan Satu Liter Air

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana kinerja sistem secara keseluruhan dan mengamati respons kontroler terhadap *setpoint* ketika mendapatkan gangguan berupa perubahan suhu yang turun. Setelah melakukan pengujian, didapatkan hasil respon setelah diberi gangguan yang dapat dilihat dalam Gambar 4.2.

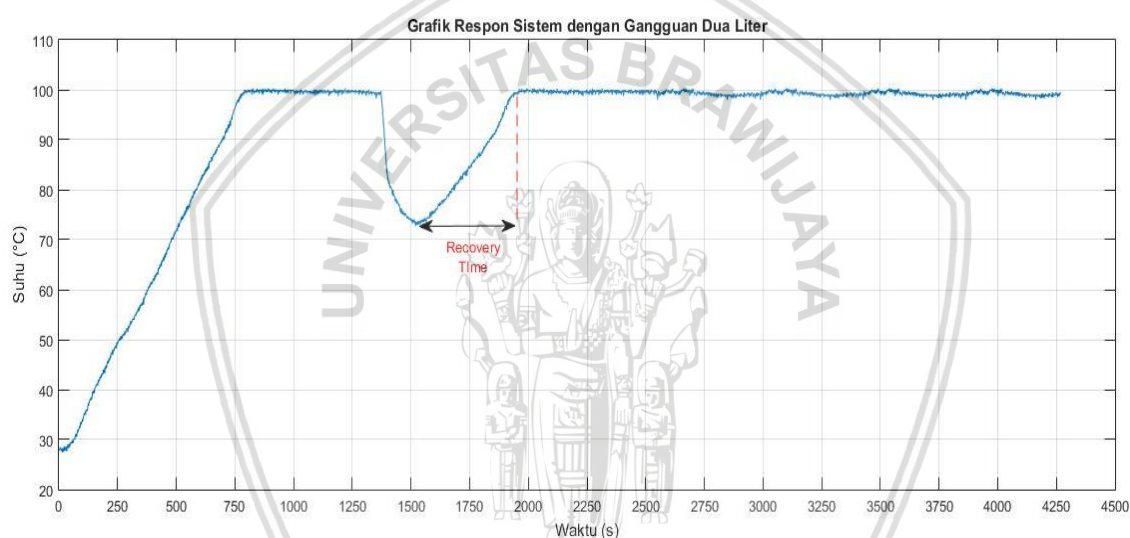


Gambar 4.2 Gambar Respon Sistem dengan Gangguan Satu Liter Air

Dari grafik hasil pengujian, dapat dilihat respon sistem terhadap gangguan berupa perubahan suhu yang dingin. Sistem dapat kembali pada keadaan *steady state* setelah terjadinya gangguan dan mengalami proses *recovery time* sebesar 222 detik. Dengan begitu dapat dikatakan sistem kontrol pada perancangan ini telah bekerja dengan baik.

#### 4.2.2 Pengujian dengan Gangguan Penambahan Dua Liter Air

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana kinerja sistem secara keseluruhan dan mengamati respons kontroler terhadap *setpoint* ketika mendapatkan gangguan berupa perubahan suhu yang turun. Setelah melakukan pengujian, didapatkan hasil respon setelah diberi gangguan yang dapat dilihat dalam Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Gambar Respon Sistem dengan Gangguan Dua Liter Air

Dari grafik hasil pengujian, dapat dilihat respon sistem terhadap gangguan berupa perubahan suhu yang dingin. Sistem dapat kembali pada keadaan *steady state* setelah terjadinya gangguan dan mengalami proses *recovery time* sebesar 432 detik. Dengan begitu dapat dikatakan sistem kontrol pada perancangan ini telah bekerja dengan baik.



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian dan analisis yang telah dilakukan dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Kontroler PID dengan parameter  $K_p = 13,54$ ,  $K_i = 0,059$  dan  $K_d = 771,78$ , dapat diimplementasikan secara langsung pada sistem pengendalian suhu pada *boiler* untuk mencapai *set point*  $100^{\circ}\text{C}$ , dan didapatkan nilai *settling time* ( $t_s$ ) = 812 detik, waktu tunda ( $t_d$ ) = 406 detik, *error steady state* sebesar 1,23%.
2. Hasil pengujian dengan menggunakan gangguan terhadap kontroler PID menggunakan Arduino Uno menunjukkan bahwa respon sistem dapat kembali pada keadaan *steady state* dan mengalami proses *recovery time* sebesar:
  - A. Gangguan dengan penambahan air satu liter sebesar 222 detik.
  - B. Gangguan dengan penambahan air dua liter sebesar 432 detik.

#### 5.2 Saran

Dalam perancangan dan pembuatan alat ini masih terdapat banyak kelemahan dan kekurangan. Penggunaan sensor yang lebih baik dapat memberikan data yang lebih akurat. Salah satunya penggunaan sensor *termocouple type-k* yang dirasa kurang dan dalam perancangan alat ini masih bisa dikembangkan dengan metode lain, dan dapat di tambahkan kontroler pada beberapa faktor seperti tekanan serta jumlah uap yang dihasilkan.



## DAFTAR PUSTAKA

- Agung R. H., Rivai M., Pirngadi H. 2017. *Alat Penentu Parameter PID dengan Metode Ziegler-Nichols pada Sistem Pemanas Air*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).
- Andriansyah A., Hidyatama O. 2013. *Rancang Bangun Prototype Elevator Menggunakan Microcontroller Arduino Atmega328P* (Skripsi). Universitas Mercu Buana.
- Arissandi, R. 2014. *Implementasi Kontrol Logika Fuzzy (KLF) Sebagai Pengendali Suhu Sistem Pasteurisasi Kuning Telur Cair Berbasis Mikrokontroler Arduino* (Skripsi). Universitas Brawijaya.
- Bolton, W. 2006. *Sistem Instrumentasi dan Sistem Kontrol*. Terjemahan: Soni Astranto. Jakarta : Erlangga.
- Falah, R. M. N, 2010, *Simulasi Sistem Kontrol Suhu di Reheater pada Boiler di PLTU Paiton Unit 7 & 8*. (Skripsi). Politeknik Elektronika Negeri Surabaya
- Hakim, E. A. 2012. *Sistem Kontrol*. Malang : Universitas Muhammadiyah Malang (UMM Press).
- Hanafi, A. R. 2016. *Sistem Pengendali Kecepatan Mini Steam Turbin Menggunakan Kontroler PI Berbasis Arduino Uno* (Skripsi). Universitas Brawijaya.
- Jamal, Z. 2015. *Implementasi Kendali PID Penalaan Ziegler-Nichols Menggunakan Mikrokontroler*. Informatics and Business Institute Darmajaya.
- Kurniawan, W. 2009. *Pengendalian Suhu dan Ketinggian Air pada Boiler Menggunakan Kendali PID dengan Metode Root Locus*. (Tesis). Universitas Brawijaya
- Ogata, K. 2011. *Modern Control Engineering*. 5<sup>th</sup> Edition. New Jersey: Pearson Education.
- Ogata, K. 1997. *Teknik Kontrol Automatik*. terjemahan: Edi Laksono Ir. Jakarta : Erlangga.
- Raharjo W. D, Karnowo. 2008. *Mesin Konversi Energi*. Semarang : Universitas Semarang Press.
- Rusli, M. 2015. *Dasar Teknik Kontrol*. Malang : Universitas Brawijaya Press (UB Press).
- Soelaiman, Sofyan, Priyanto N. 2017. *Analisa Prestasi Kerja Turbin Uap Pada Beban Yang Bervariasi* (Skripsi). Universitas Muhammadiyah Jakarta.
- Syamsir. A. M. 1988. *Pesawat Konversi Energi*. Jakarta : Rajawali.
- Yohana, E., Askhabulyamin. 2009. *Perhitungan Efisiensi dan Konversi dari Bahan Bakar Solar ke Gas pada Boiler Ebara HKL 1800 KA*. (Skripsi). Universitas Diponegoro
- Yudaningtyas, E. 2017. *Belajar Sistem Kontrol*. Malang: UB Press



